



DECKBLATT



EU 052.6	Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
	N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	X A A X X	A A	N N N N	N N
	9 K		-	H	RB	0017	00

Titel der Unterlage: Parameterstudien zur Grundwasserbewegung auf einem Modellschnitt vom Salzgitter Höhenzug zum Salzstock Calberlah - Hydraulische Höhen, Fußwege, Fließzeiten Archiv-Nr.: 98994	Seite: I.
	Stand: Febr. 1986

Ersteller: BGR	Textnummer:
-------------------	-------------

Stempelfeld:

PSP-Element TP....9 K/2122423	zu Plan-Kapitel: 3.1.10.4
-------------------------------	---------------------------

	PL 10.07.86  Freigabe für Behörden	PL 10.07.86  Freigabe im Projekt
--	---	--

Diese Unterlage unterliegt samt Inhalt dem Schutz des Urheberrechts sowie der Pflicht zur vertraulichen Behandlung auch bei Beförderung und Vernichtung und darf vom Empfänger nur auftragsbezogen genutzt, vervielfältigt und Dritten zugänglich gemacht werden. Eine andere Verwendung und Weitergabe bedarf der ausdrücklichen Zustimmung der PTB.

Revisionsblatt



EU 052.6	Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
	N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	X A A X X	A A	N N N N	N N
	9 K			H	RB	0017	00

Titel der Unterlage: Parameterstudien zur Grundwasserbewegung auf einem Modellschnitt vom Salzgitter Höhenzug zum Salzstock Calberlah-Hydraulische Höhen, Fließwege, Fließzeiten Archiv-Nr.: 98994	Seite: II. Stand: Febr. 1986
---	-------------------------------------

Rev.	Revisionsst. Datum	verant. Stelle	Gegenzeichn. Name	rev. Seite	Kat. *)	Erläuterung der Revision

*) Kategorie R = redaktionelle Korrektur
 Kategorie V = verdeutlichende Verbesserung
 Kategorie S = substantielle Änderung
 Mindestens bei der Kategorie S müssen Erläuterungen angegeben werden.

**Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
Hannover**

**Parameterstudien zur Grundwasserbewegung
auf einem Modellschnitt vom
Salzgitter Höhenzug zum Salzstock Calberlah
- Hydraulische Höhen, Fließwege, Fließzeiten -**

Ergänzender Bericht zum Plan Konrad

Sachbearbeiter:



Datum:

Februar 1986

Archiv-Nr.

98994

Tagebuch-Nr.:

10502/86

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung	1
2. Hydrogeologische Ausgangssituation	1
3. Analytische Abschätzungen zu Fließgeschwindigkeiten und Laufzeiten	6
4. Das numerische Modell	8
5. Umsetzung der hydrogeologischen Vorgaben	11
5.1 Referenzfall	11
5.2 Varianten	14
6. Diskussion der Ergebnisse	17
6.1 Allgemeine Aussagen	17
6.2 Geschwindigkeitsfelder und Fließwege	21
7. Anmerkungen zu Diffusion und Dispersion	32
8. Bewertung	35
9. Literaturverzeichnis	39
10. Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	40

Anlage 1	Analytische Abschätzung zu Fließgeschwindigkeit und Laufzeit
Anlage 2	Modellschnitte
Anlage 3	Filtergeschwindigkeitsfelder
Anlage 4	Abstandsgeschwindigkeitsfelder
Anlage 5	Fließwege und Fließzeiten
Anlage 6	Isolinien der hydraulischen Höhen
Anlage 7	Analytische Abschätzungen zum Diffusionseffekt
Anlage 8	Analytische Abschätzungen zum Dispersionseffekt

1. Einleitung

Für die tiefen geologischen Schichten im Untersuchungsgebiet Konrad können keine exakten hydraulischen Kenndaten angegeben werden. Es liegen relativ wenig Daten mit großer Streubreite vor. Daraus lassen sich hydrogeologisch sinnvolle Bandbreiten für die Durchlässigkeitswerte der einzelnen Schichtglieder ableiten. Für das hydrogeologische Modell wurde aus diesem Spektrum ein Parametersatz ausgewählt, der als konservativ für das Gesamtmodell (d.h. hier möglichst geringe Laufzeiten vom Grubenbereich bis zur Biosphäre) angesehen werden konnte. Andere Parameterkombinationen innerhalb dieser vorgegebenen Bandbreiten sind jedoch ebenfalls als hydrogeologisches Modell denkbar.

Zur Verifizierung des hydrogeologischen Modells wurden daher mit Hilfe eines 2-dimensionalen numerischen Modells Parametervariationen bei den Durchlässigkeiten durchgeführt. Dabei lag das Hauptgewicht auf der Prüfung der Daten im Hinblick auf ihre Konservativität. Neben Aussagen zu den hydraulischen Höhen und den Fließgeschwindigkeiten ließen sich auch Fließwege und mittlere Fließzeiten aus dem Grubenbereich zur Biosphäre berechnen.

Der vorliegende Bericht faßt diese Arbeiten sowie einige zusätzliche Anmerkungen zu Diffusions- und Dispersionseinflüssen auf die Fließzeiten zusammen. Die Modellrechnungen dienten u.a. auch zur Vorbereitung von 3-dimensionalen Modellrechnungen zur Grundwasserbewegung sowie der darauf aufbauenden Radionuklidausbreitungsrechnungen von TUB/GSF.

2. Hydrogeologische Ausgangssituation

Die im folgenden auszugsweise wiedergegebene hydrogeologische Situation ist in /3/ näher dargestellt. Als Grundlage für die Rechnungen wurde ein repräsentativer hydrogeologischer Schnitt gewählt, der das Untersuchungsgebiet von SW nach NE durchzieht (Abb. 1).

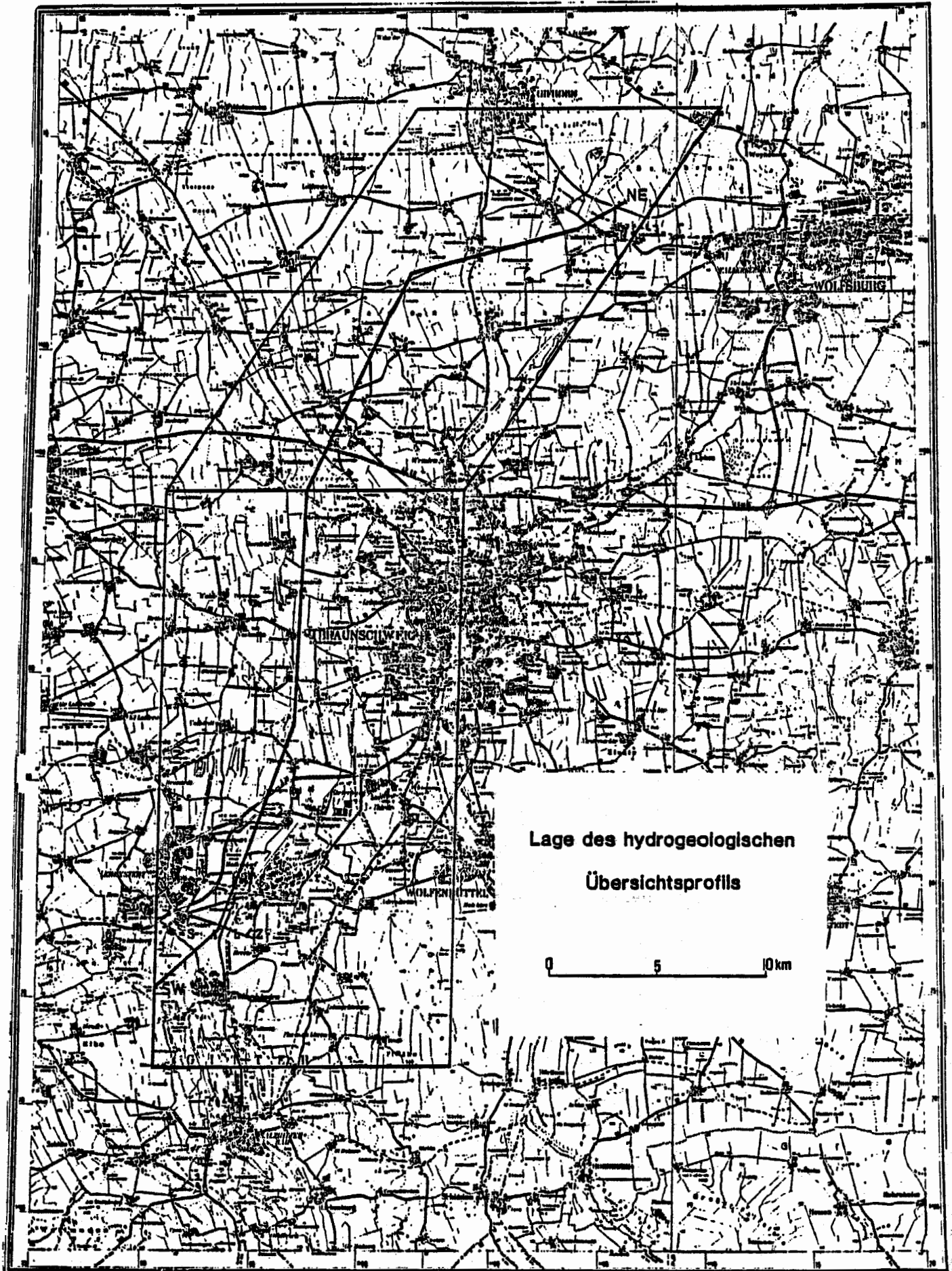


Abb.: 1

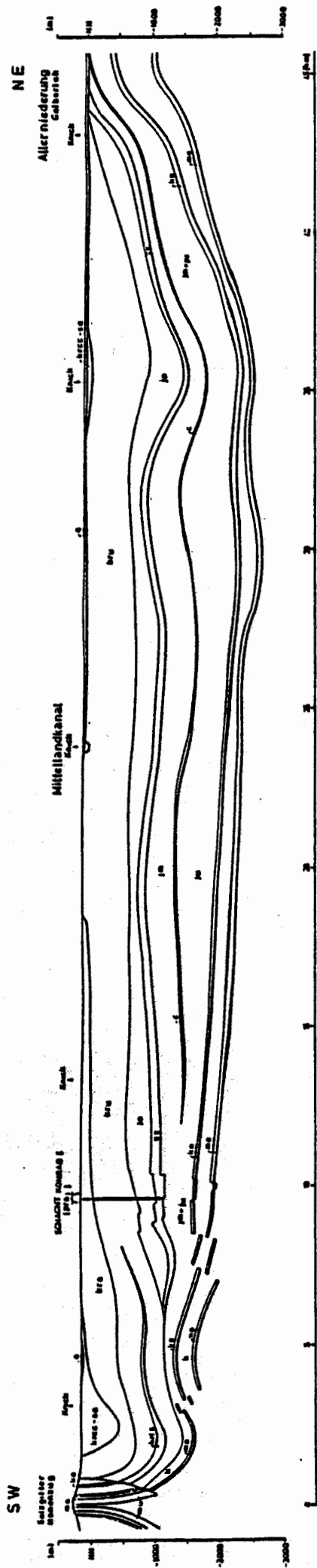
Im SW erfaßt der Schnitt (Abb. 2) das Grundwasserneubildungsgebiet des Salzgitter-Höhenzugs. Hier streichen an der Oberfläche Oberer Muschelkalk und Rhät aus, die als verhältnismäßig gut durchlässige Wasserleiter das hydraulische Potential für die Bewegung des Tiefenwassers liefern. Der Schnitt endet im NE am Salzstock Calberlah. An dessen Flanke steigt das Oxford auf und hat direkten Kontakt zum obersten quartären Grundwasserleiter. Dabei handelt sich um den einzigen Bereich im Untersuchungsgebiet, in dem ein Kontakt zwischen Oxford und einem höherliegenden Wasserleiter vorhanden ist.

Das gesamte System wird bestimmt durch die auch im Schnitt gut erkennbare Wechsellagerung zwischen schwer durchlässigen Tonen und besser leitenden Schichten, die zumeist keinen direkten Kontakt untereinander haben. An zahlreichen Stellen - im Schnitt im südlichen Teil gut erkennbar - sind die gutleitenden Schichten durch Störungen gegeneinander versetzt. Diese Störungen sind jedoch zumeist nicht über die ganze Breite des Systems zu beobachten, so daß Fließwege bestehen, die diese Störungen umgehen. Z.T. ist durch diese Störungen auch der Anschluß zweier verschiedener Wasserleiter aneinander möglich.

Bei den durchlässigeren Schichten handelt es sich (vom älteren zum jüngeren Gestein) um den klüftig ausgebildeten Oberen Muschelkalk, den Sandsteinhorizont des Rhät einschließlich nicht gesondert betrachteter sandiger Lagen des Mittleren Keuper, den zum Dogger gehörenden, z.T. geklüfteten Cornbrash-Sandstein, den Kluftwasserleiter Oxford, den Hilssandstein, die geklüfteten Plänerkalke sowie die gut durchlässigen Schichten des Tertiär und Quartär. Dem Kimmeridge, dem Wealden und dem Mürder Mergel (Portland) wird aufgrund seiner Ausbildung eine etwas geringere Durchlässigkeit zugeordnet. Geringer durchlässige Schichten im Modellgebiet sind ferner die Emscher Mergel.

Die schlecht durchlässigen Schichten lassen sich grob in zwei Bereiche einteilen. Der erste Bereich umfaßt die Ton- und Mergelsteine des Dogger, Lias und Keuper. Bei diesen Schichten ist im Bereich der zahlreichen Störungen teilweise mit höheren Durchlässigkeiten durch Feinstklüftung zu rechnen.

Hydrogeologisches Übersichtsprofil durch das Modellgebiet



- q Quartär ja Malm (ex-Oxford) mo Oberer Muschelkalk
kre Oberkreide z. T. mit Emscher Mergel (kre-so) ja+ju Dogger und Lias z. T. mit Carabrochtic) mu Unterer Muschelkalk
kru Unterkreide z. T. mit Hiltzsandstein (kri.s) k Keuper (ko-Rhét)

Abb.: 2

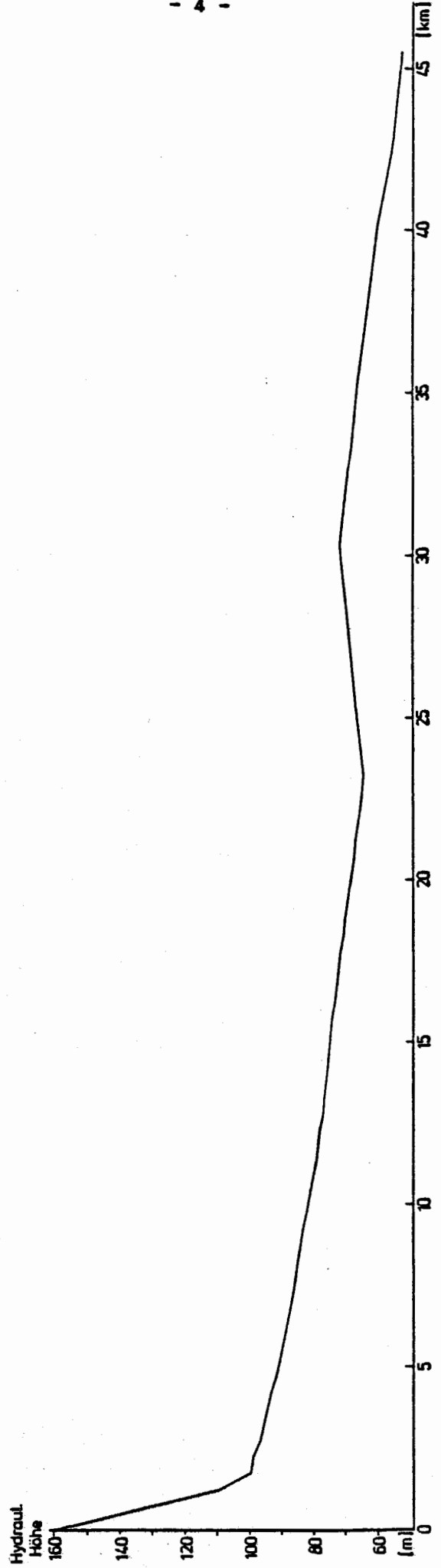


Abb.: 3

Daneben sind oftmals geringmächtige Sandsteinlagen eingeschaltet. Im zweiten Bereich, den Ton- und Mergelsteinen der Unterkreide, fehlen diese jedoch. Daher können hier die Durchlässigkeiten noch geringer angenommen werden als bei den tiefer liegenden älteren Ton- und Mergelsteinen.

Als Ausgangsbasis für die Modellrechnungen dienten die unter Tab. 1 angegebenen Durchlässigkeits- und Porositätswerte (vgl. /3/). Porosität steht dabei immer für effektive Porosität (d.h. abflußwirksamen Porenanteil). Spalte 1 enthält die Durchlässigkeitsbeiwerte für den im folgenden zugrunde gelegten Referenzfall, Spalte 2 die Bandbreite für Parametervariationen, Spalte 3 die vorgegebenen Porositätswerte.

Gesteinsart	Durchlässigkeitsbeiwerte (m/s)		Porositäten %
	Referenzfall	Bandbreite	
Quartär	10^{-5}	$10^{-4} - 10^{-7}$	25
Tertiär	10^{-5}	$10^{-5} - 10^{-7}$	25
Emscher Mergel	10^{-8}	$10^{-8} - 10^{-9}$	20
Plänerkalke	10^{-6}	$10^{-5} - 10^{-7}$	5
Unterkreide außer Hils	10^{-10}	$10^{-10} - 10^{-13}$	10
Hilssandstein	10^{-5}	-	25
Kimmeridge, Wealden und Mündler Mergel	10^{-8}	$10^{-7} - 10^{-9}$	10
Oxford	10^{-7}	$10^{-7} - 10^{-9}$	2
Cornbrash	10^{-6}	$10^{-6} - 10^{-10}$	5
Dogger, Lias und Keuper			
Ton- und Mergelsteine	10^{-10}	$10^{-10} - 10^{-12}$	10
Rhät	10^{-6}	$10^{-6} - 10^{-7}$	20
Oberer Muschelkalk	10^{-6}	$10^{-6} - 10^{-8}$	2

Tab. 1: Durchlässigkeitsbeiwerte und effektive Porositäten
(hydrogeologische Vorgabe aus /3/)

Vorgegeben wurde für die Berechnungen ferner ein ungefährender Verlauf für die oberflächennahe hydraulische Höhe (Abb. 3) abgeleitet aus den Grundwasserhöhengleichen für das Untersuchungsgebiet. Diese nimmt im Bereich des Salzgitter-Höhenzugs recht schnell von mehr als 170 m (z. Teil 195 m) ü. NN auf 90 m ü. NN ab. Danach fällt sie relativ langsam bis zum Mittellandkanal auf etwa 65 m ü. NN, steigt dahinter aufgrund einer leichten Hochlage noch einmal auf ca. 72 m ü. NN an, um dann zum Allertal hin auf ca. 55 m ü. NN abzunehmen.

Als Randbedingung wurde angenommen, daß die Ränder sowohl zu den Seiten als auch nach unten geschlossen sind. Es wurde zugrunde gelegt, daß

- 1) der Salzgitter-Höhenzug als Wasserscheide fungiert;
- 2) das Allertal eine Stromlinie darstellt, wo auch das tieffließende Grundwasser aufsteigt und
- 3) aus dem Oberen Muschelkalk kein Wasser in tiefere Schichten abströmt.

3. Analytische Abschätzungen zu Laufzeiten und Fließgeschwindigkeiten

Mit einfachen Methoden lassen sich bereits erste Aussagen zu mittleren Abstandsgeschwindigkeiten und Laufzeiten vom Grubenbereich durch das Oxford bis zum Quartär im Norden treffen.

Die hydraulische Höhe h , d.h. hier der Grundwasserstand über NN, beträgt am Salzgitter-Höhenzug maximal etwa 195 m, im Mittel über 500 m Länge etwa 170 m. Im Gebiet des Salzstocks Calberlah existiert im Quartär noch eine hydraulische Höhe von ca. 55 m. Daraus ergibt sich als größte Potentialdifferenz 140 m. Realistischerweise wird dieser Wert jedoch nicht anzusetzen sein, sondern bezogen auf das o.a. gesamte Mittel eher etwa 120 m.

Wie auch die später beschriebenen Modellrechnungen zeigen, kann aufgrund der vorliegenden Gegebenheiten mindestens von einer Abnahme des Potentials bis zur Grube von etwa 15 % ausgegangen werden. Für eine realistische Abschätzung ist daher eine Potentialdifferenz von ca. 100 m, maximal von etwa

120 m zwischen dem Grubenbereich und dem quartären Wasserleiter beim Salzstock Calberlah vorhanden.

Geht man von der maximalen Potentialdifferenz aus, so folgt für die mittlere Abstandsgeschwindigkeit v_m im Oxford (Entfernung Grube - Salzstock Calberlah ca. 36 km, Durchlässigkeitsbeiwert $k_f = 10^{-7}$ m/s, Porosität $n_e = 0.02$):

$$|v_m| = \left| \frac{k_f}{n_e} \text{ grad } h \right| = \frac{10^{-7}}{0.02} \cdot \frac{120}{36000} \text{ [m/s]}$$

$$= 1.7 \cdot 10^{-8} \text{ [m/s]} = 0,53 \text{ [m/a]}$$

Daraus ergibt sich eine minimale mittlere Laufzeit t_m für einen rein konvektiven Transport von

$$t_m = \frac{36000}{|v_m|} \approx 68000 \text{ a}$$

Legt man die realistischere Potentialdifferenz von 100 m zugrunde, folgt hieraus

$$v_m = 1.4 \cdot 10^{-8} \text{ [m/s]} = 0,44 \text{ [m/a]} \text{ und} \\ t_m \approx 82000 \text{ a;}$$

d.h. die rein konvektiv bedingten mittleren Laufzeiten liegen minimal bei 70 - 80 Tausend Jahren.

Eine Berechnung, die schon näher an der Realität liegt, läßt sich mit analytischen Lösungen durchführen (siehe /5/). Damit waren erste Abschätzungen zu Fließzeiten und Fließgeschwindigkeiten möglich. Es handelt sich um einen Zweischichtenansatz (z.B. Oxford mit überlagernder schlecht durchlässiger Schicht).

Als Beispiel sei hier der Fall angeführt, bei dem ein Potentialabfall von 100 m auf 36 km im Oxford (Mächtigkeit 100 m) angenommen wird. Die über-

lagernde Schicht wird im Mittel mit 800 m und einem Durchlässigkeitsbeiwert von $1,3 \cdot 10^{-10}$ [m/s] angesetzt. Der Durchlässigkeitsbeiwert ergibt sich als Mittelwert unter Berücksichtigung der Mächtigkeiten und Durchlässigkeiten der das Oxford überlagernden Schichten. Der nördliche Rand wird als offen angesehen. Damit wird ein Ausstrom beim Salzstock Calberlah simuliert.

Es ergibt sich (Anl. 1) eine mittlere Abstandsgeschwindigkeit von 0,49 m/a und eine Laufzeit durch die untere besser leitende Schicht von 307 Tausend Jahren. Die Laufzeiten bis zur Oberfläche der überlagernden Schicht liegen am Startpunkt (linker Rand) bei 153 Tausend Jahren und nehmen nach Norden stark zu. Da am oberen Rand eine hydraulische Höhe von $h = 0$ angesetzt ist, sind diese Laufzeiten nicht realistisch, sondern z. T. wesentlich zu kurz.

Es folgt, daß bereits diese einfachen Abschätzungen einige wesentliche Aussagen liefern. Die Angaben können natürlich die Struktur des Untergrundes nur näherungsweise berücksichtigen. Um der Realität näher zu kommen, wurden daher 2-dimensionale Rechnungen durchgeführt, die im folgenden dargestellt werden.

4. Das numerische Modell

Für die Rechnungen zur Grundwasserbewegung wurde ein 2-dimensionales numerisches Modell verwendet ¹⁾. Da insbesondere das Langzeitverhalten von Interesse ist, können zeitlich kurzfristige Spiegelschwankungen im oberflächennahen Grundwasserbereich vernachlässigt werden, d.h. es können stationäre Verhältnisse zugrund gelegt werden. Für eine realistische Nachbildung müßten die im Grundwasser vorkommenden Dichteunterschiede berücksichtigt

¹⁾ Zu dem verwendeten Modell wird ein gesonderter BGR-Bericht erstellt.

werden. Da jedoch eine Veränderung im Fließverhalten hin zu höheren Geschwindigkeiten durch Dichteeinflüsse nur in geringem Maße denkbar ist, wurde hier vereinfachend von Grundwasser konstanter Dichte ausgegangen. Damit lautet dann unter Verwendung der einfachen Form des Darcy Gesetzes:

$$\vec{q} = -\bar{k}_f \text{ grad } h$$

die verwendete Kontinuitätsgleichung:

$$\text{div } \vec{q} + Q = - \text{div } (\bar{k}_f \text{ grad } h) + Q = 0$$

mit Q	Quellen oder Senkenterm	$[m^3/(m^3s)]$
h	hydraulische Höhe	$[m]$
\vec{q}	Filtergeschwindigkeit	$[m^3/(m^2s)]$
\bar{k}_f	Durchlässigkeitsbeiwerttensor	$[m/s]$

Da im Gebiet keine Quellen oder Senken zu betrachten sind (d.h. $Q = 0$), vereinfacht sich die Gleichung zu

$$\text{div } (\bar{k}_f \text{ grad } h) = 0$$

oder 2-dimensional (kartesisches Koordinatensystem)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_f^x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_f^z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = 0$$

mit k_f^x , k_f^z x- bzw. z-Komponente des Durchlässigkeitsbeiwerttensors. Da für das hydrogeologische Modell keine exakten Angaben zur Anisotropie gegeben werden können, wird vereinfachend von isotropen Verhältnissen ausgegangen. D.h. beide Komponenten sind gleich.

Zur Lösung dieser Differentialgleichung (d.h. Berechnung des h-Feldes) wurde ein zentrales Differenzenverfahren mit Gauss-Jordan-Algorithmus und sukzessiver Überrelaxation angewandt. Es zeigt sich, daß dieses Verfahren zwar recht langsam konvergiert, jedoch auch bei dem zu bearbeitenden Schnitt mit starken Inhomogenitäten und Durchlässigkeitskontrasten zu einer stabilen Lösung führt. Versuche mit einem anderen Programm, das das wesentlich schnellere ADI-Verfahren verwendet, schlugen wegen divergenten Verhaltens fehl.

Das h-Feld liefert über das Darcy-Gesetz den Ausgangspunkt für die Berechnungen von Abstandsgeschwindigkeiten \vec{v} , wobei gilt:

$$\vec{v} = \vec{q} / n_e$$

mit n_e effektive Porosität in m^3/m^3 .

Mit den Abstandsgeschwindigkeiten lassen sich Fließwege für Wasserteilchen näherungsweise bestimmen und die zugehörigen mittleren Laufzeiten von einem Startpunkt bis zur Biosphäre berechnen. Dabei verwendet das Modell fest vorgegebene Zeitschritte. Bei der Berechnung des Geschwindigkeitsbetrages und der Richtung vom jeweiligen neuen Startwert aus, die für den fest vorgegebenen Zeitschritt gelten, gehen die am nächsten liegenden Knotenpunkte mit ihren Geschwindigkeitskomponenten linear gemittelt ein. Diese Mittelung führt dazu, daß der Fließweg eher in Richtung der größeren Geschwindigkeit verläuft. Sie wurde gewählt, um bei der Bestimmung der Fließzeiten möglichst konservativ zu sein.

Bei der Bestimmung der Fließwege wird für ein sich bewegendes Wasserteilchen nur der konvektive, d.h. der durch das Grundwasserfließfeld bedingte Transport ohne diffusive und dispersive Effekte berücksichtigt. Bezogen auf die Vernachlässigung der Dispersion handelt es sich bei dieser Bewegung um einen mittleren Fließweg mit einer mittleren Teilchenlaufzeit. Hinsichtlich der Diffusion kann bei sehr kleinen Geschwindigkeiten der diffusive Transport gegenüber dem konvektiv-dispersiven Transport sogar wesentlich größer sein.

5. Umsetzung der hydrogeologischen Vorgaben

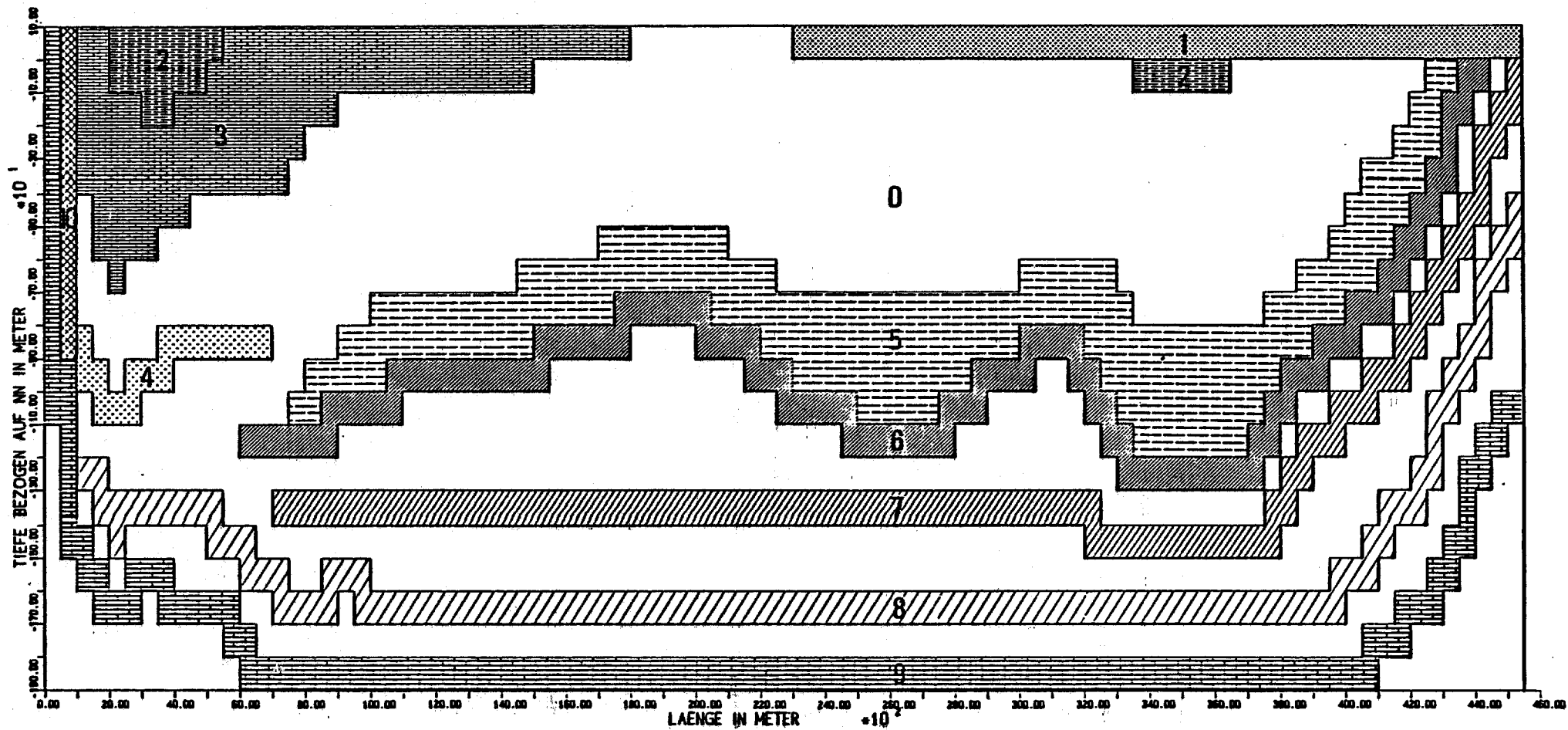
5.1 Referenzfall

Der unter 2. beschriebene hydrogeologische Schnitt wurde für die numerischen Rechnungen in einen Modellschnitt übertragen. Der Referenzfall ist in Abb. 4 dargestellt und wird im folgenden als Version 1 bezeichnet. Es wurden einige Vereinfachungen vorgenommen.

Das im Modellgebiet nur geringmächtige Tertiär wurde vernachlässigt. Im Südteil wurde ferner das Quartär nicht berücksichtigt bzw. dem Plänerkalk zugeschlagen. Im Nordteil taucht das Quartär mit einer erhöhten Mächtigkeit auf. Das hat jedoch auf die hier zu untersuchende Situation keine Auswirkung. Im Bereich des Salzgitter-Höhenzugs hat der steilstehende Obere Muschelkalk bei Berücksichtigung vorhandener durchlässiger Teile des Rhät eine erhöhte Mächtigkeit. Der tiefer liegende Hilssandstein wurde an den Oberen Muschelkalk/Rhät angeschlossen (was geologisch für Teilbereiche des Salzgitter-Höhenzugs aufgrund von Störungen denkbar ist). Er streicht aufgrund der Lage des Modellschnittes nicht übertage aus. Die Struktur der Unterkreidetone, des Kimmeridge, der Münder Mergel und des Oxford entspricht im Modell möglichst genau der realen Situation. Im folgenden sind unter Kimmeridge immer die Schichten von Kimmeridge und Portland zu verstehen.

Der Modellschnitt wird durch eine maximale Tiefe von 1900 m u. NN begrenzt. Das hydrogeologische Profil (Abb. 2) geht in seinem Mittelteil bis zu einer Tiefe von etwa 2400 m u. NN. Dadurch sind im Modell die Ton- und Mergelsteine des Jura und Keuper in ihren Mächtigkeiten reduziert. Die gut durchlässigen Schichten Oberer Muschelkalk und Rhät haben eine leicht erhöhte Mächtigkeit, der "Cornbrash" ist in seiner Mächtigkeit etwas stärker erhöht.

Die im hydrogeologischen Profil dargestellten Störungszonen, die den Oberen Muschelkalk und das Rhät im Profil oft gegeneinander versetzen, wurden als



- 12 -

- | | | | | | |
|-----------------|-----------------------------|-------------------------------------|--------------|---------------------|--|
| 1 QUARTÄR | 3 OBERKREIDE
PLÄNERKALKE | 5 KIMMERIDGE
PORTLAND
WEALDEN | 7 CORNBRAUSH | 9 OBERER MÜSHELKALK | 0 TON- und MERGELSTEINE
der UNTERKREIDE, des JURA
und des KEUPER |
| 2 EMSCHERMERGEL | 4 HILSSANDSTEIN | 6 OXFORD | 8 RHÄT | 10 RHÄT und TÖNE | |

MODELL-SCHICHTVERTEILUNG IN EINEM VERTIKALSCHNITT IM UNTERSUCHUNGSGEBIET KONRAD
 VERSION. 1.0
 MASSSTÄBE LAENGE, 1: 10000. TIEFE, 1: 1000.

durchgängige Bereiche modelliert, da zumeist durch Umläufigkeiten (3-dimensional betrachtet) ein Kontakt vorhanden ist.

In einigen Varianten wurden Änderungen an dieser Modellstruktur vorgenommen. Darauf wird bei den Ergebnissen und der Diskussion der Varianten eingegangen. Die steilstehenden Schichten (Bereich Salzgitter-Höhenzug und Bereich Salzstock Calberlah) wurden durch Treppenstufen approximiert.

Der Abstand zwischen den Knotenpunkten beträgt im Modell in x-Richtung $\Delta x = 500$ m, in z-Richtung $\Delta z = 100$ m, d.h. es liegt eine äquidistante Verteilung der Stützstellen in die einzelnen Richtungen vor. Als Randbedingungen wurden am linken und rechten Rand die Durchflüsse in x-Richtung (q_x) und am unteren Rand der Durchfluß in z-Richtung (q_z) gleich Null gesetzt (Wasserscheide, bzw. Stromlinien). Die Verteilung der hydraulischen Höhen am oberen Rand entspricht Abb. 3.

In der Tendenz bedeuten die Vereinfachungen (die späteren Rechnungen belegen diese Angaben):

Im Bereich des Salzgitter-Höhenzugs wird mehr Grundwasser aufgrund der im Modell vorgegebenen relativ großen Einstromfläche neu gebildet als es bei einer kleineren Einstromfläche der Fall wäre. Durch die Reduzierung der hydraulischen Höhe (150 m im Mittel anstelle von 170 m für den ersten Knotenpunkt) wird dieser Effekt wieder aufgehoben. Die Reduzierung ist gleichzeitig wichtig, da Oberflächenabfluß abgesehen von sehr geringen Ausstromraten im zweiten oberen Knotenpunkt bei einigen Versionen vernachlässigt wird. D.H. das im Modell im Bereich des Salzgitter-Höhenzugs im Oberen Muschelkalk neugebildete Grundwasser tritt fast vollständig in das Tiefengrundwasser ein. Die zwischen Plänerkalk und Oberem Muschelkalk am südlichen Modellrand eingeschobene Schicht dient dabei zur Berücksichtigung von Ton- und Mergelsteinen sowie bruchstückhaft vorhandener besser leitender Schichten.

Die leichte Erhöhung der Mächtigkeiten von Rhät und Oberem Muschelkalk hat geringen Einfluß auf Durchflußmenge und -geschwindigkeit. Die erhöhte Mächtigkeit des "Cornbrash" sorgt für einen erhöhten Abtransport von Grundwasser - im allgemeinen aus den tieferliegenden Wasserleitern stammend -

durch diesen Leiter, verringert also die Zufuhr nach oben. Dagegen wird durch die verringerten Mächtigkeiten der Ton- und Mergelsteine der Zustrom nach oben auch in das Oxford erhöht. Der Aufbau eines Gegenpotentials im Norden, das die Bewegung im Oxford verlangsamt, wird jedoch erleichtert. Die Randbedingung für Oberen Muschelkalk und Rhät im Norden ($q_x = 0$), aufgrund derer das Wasser insgesamt nach oben abströmen muß, wirkt ebenfalls in Richtung des Aufbaus eines Gegenpotentials, das die Bewegung durch das Oxford hemmt.

Dagegen sorgt der Anschluß des Hilssandsteins an den Muschelkalk für einen zusätzlichen Zustrom aus diesem Wasserleiter in das Oxford.

5.2 Varianten

Von dem unter 5.1 beschriebenen Referenzfall wurden einige abweichende Varianten gerechnet. In den Versionen 2. und 3. wurden die Tonschichten in 2 verschiedene Bereiche aufgeteilt (Anl. 2.1). Wie bereits in Kapitel 2 angegeben, fehlen in den Ton- und Mergelsteinen der Unterkreide die in den tiefer liegenden Ton- und Mergelsteinen vorkommenden sandigen Einlagerungen. Daher wurde für die Unterkreidetone in diesen Varianten eine geringere Durchlässigkeit eingesetzt als für die restlichen Ton- und Mergelsteine.

In den Versionen 4. wurde zusätzlich eine Störung im Oberen Muschelkalk und Rhät unterstellt, die diese Wasserleiter vollständig in 2 Teile aufteilt. Diese Störung wurde ungefähr im Bereich des Bleckenstedter Sprunges ange-
setzt (Anl. 2.2).

Die Versionen 5. und 6. basieren auf einem älteren Schnitt, bei dem eine direkte Verbindung zwischen Korallenoolith und "Cornbrash" denkbar war und daher zugelassen wurde. Da diese jedoch aus geologischen Gründen nicht unterstellt werden kann, wurden hierzu erste Rechnungen durchgeführt, die jedoch nur abschätzenden Charakter hatten. In Version 5. wurde dabei zu-

sätzlich der Hilssandstein von einem direkten Kontakt zum Oberen Muschelkalk ausgeschlossen.

Der Frage der Anbindung des Hilssandstein und ihrer Auswirkung diene auch Version 7. Hier wurde die Verbindung zwischen Oberen Muschelkalk und Hilssandstein unterbunden, jedoch eine Anbindung des Hilssandstein an die Plänkerkalke vorgenommen, um den Ausbiß des Hilssandstein bei Adersheim näherungsweise einzubeziehen (Anl. 2.3).

Das Fließverhalten bei einer hydrogeologisch sinnvoll erscheinenden Unterteilung des "Cornbrash" in einen relativ undurchlässigen südlichen Teil (Ergebnis aus der Bohrung Konrad 101) und einen durchlässigen nördlichen Teil wurde in Version 8 berechnet (Anl. 2.4). Version 9. schließlich stellt eine Verbindung von Version 4. und Version 8. dar (Anl. 2.5).

Insbesondere in den Versionen 1., 3. und 4. wurden verschiedene Parameter variiert. Eine Liste aller Varianten mit den zugehörigen Durchlässigkeitsbeiwerten enthält Tabelle 2. Dabei wurden nur die Abweichungen vom Referenzfall angegeben.

Aus modelltechnischen Gründen wurde im Rhät eine Porosität von 2 % angesetzt. In einigen Fällen ist in den Ton- und Mergelsteinen von Jura und Keuper aus ebenfalls modelltechnischen Gründen mit einer Porosität von 15 % gerechnet worden. Da die Porosität nur in die Laufzeitberechnungen eingeht, jedoch alle interessierenden Wasserpfade nur durch das Oxford bzw. die darüber liegenden Schichten führen, sind diese Werte ohne Bedeutung für die Aussagen zu den Fließwegen und Fließzeiten. Auch die Änderungen des Durchlässigkeitsbeiwerts im Bereich der "Rhät-Tonschicht" am Salzgitter-Höhenzug haben keinen meßbaren Einfluß auf das gesamte Fließverhalten. Der Durchsatz durch diese Schicht ist vernachlässigbar gering.

K _f -Werte [m/s]	Version																			Porositäten %		
	† 1.1	† 1.2	1.3	† 1.4	1.5	† 1.6	1.7	1.8	† 2.1	3.1	3.2	† 3.3	3.4	† 4.1	† 4.2	5.1	6.1	6.2	7.1		† 8.1	† 9.1
Quartär	1.-5																					25
Emscher Mergel	1.-8																					20
Oberkreide Plänerkalke	1.-6			1.-7		1.-7			1.-7													5
Unterkreide	1.-10	1.-12	1.-12		1.-11	1.-11	1.-12	1.-12	1.-12	1.-12	1.-12	1.-12	1.-12	1.-12	1.-12	1.-12		1.-12	1.-12	1.-12	1.-12	10
Hilssandstein	1.-5								1.-6													25
Kimmeridge, Portland	1.-8		1.-7	1.-9	1.-8	1.-9	1.-9	1.-9		1.-9	1.-7	1.-9		1.-7					1.-7	1.-9	1.-9	10
Oxford	1.-7				1.-8		1.-6	1.-6					1.-6									2
Cornbrash	1.-6		1.-10		1.-7	1.-7	1.-10	1.-10	2.-8		1.-10	1.-10	1.-10	1.-10	1.-10				1.-7	1.-7	1.-7	5
Rhät	1.-6		1.-7	1.-7	1.-7	1.-7	1.-7		5.-8			1.-7			1.-7						1.-7	2* (20)
Oberer Muschelkalk	1.-6		1.-7	1.-7	1.-7	1.-7	1.-7		5.-8			1.-7			1.-7						1.-7	2
Ton- und Mergelsteine des Jura und Keuper	1.-10	1.-12	1.-12		1.-11	1.-11	1.-12	1.-12	5.-11 1.-11	1.-10	1.-10	1.-10	1.-10	1.-10	1.-10	1.-10		1.-12	1.-10	1.-10	1.-10	10 (z.T. 15*)
Rhät/Tonschicht am Lichten- berger Höhenzug a) horizontal	1.-10					1.-11			5.-11	1.-10	1.-10	1.-10	1.-10	1.-10	1.-10				1.-10	1.-10	1.-10	15
b) vertikal	1.-9					1.-10			1.-11	1.-10	1.-10	1.-10	1.-10	1.-10	1.-10				1.-10	1.-10	1.-10	
Verbindung Hils-Pläner																					1.-8	

(*) Porosität 2 % im Rhät
bzw. z.T. 15 % im Jura und Keuper aus modelltechn. Gründen

(**) Cornbrash getrennt in einen undurchlässigeren Südbereich und
einen durchlässigeren Nordteil

Tabelle 2: Durchlässigkeitsbeiwerte aller gerechneten Versionen
Angegeben sind jeweils die Änderungen gegenüber dem Referenzfall Version 1.1
Zur Schreibweise: x.-y bedeutet $x \cdot 10^{-y}$

6. Diskussion der Ergebnisse

6.1 Allgemeine Aussagen

Innerhalb des gesamten Fließsystems stellt der Bereich der Plänerkalke zusammen mit den eingeschlossenen Emscher Mergeln ein im wesentlichen eigenständiges Fließsystem dar. Eine Änderung des Durchlässigkeitsbeiwertes von 10^{-6} m/s im Referenzfall auf 10^{-7} m/s in einigen anderen Varianten beeinflusst nicht das Fließgeschehen in den tieferen Schichten. Die Grundwasserneubildungsraten liegen bei 10^{-6} m/s leicht zu hoch, bei 10^{-7} m/s etwas zu niedrig.

Das tieferliegende System wird - von einigen Ausnahmen abgesehen - allein durch das im Oberen Muschelkalk im Bereich des Salzgitter-Höhenzugs neugebildete Grundwasser gespeist. Werte von ca. 30 mm/a bei einer abhängig von der Diskretisierung großen Schichtmächtigkeit von 500 m für den Einstrom liegen dabei bezogen auf die Gesamteinstrommenge relativ nahe an der Realität, da oberflächennaher Abfluß fast gänzlich entfällt.

Einstromwerte, die sich bei einer Verringerung des Durchlässigkeitsbeiwertes auf 10^{-7} m/s ergeben, sind dagegen als zu gering einzuordnen. Das gilt ebenfalls bei Verringerung der Durchlässigkeitsbeiwerte der Jura und Keuper-Tonsteine auf 10^{-12} m/s sowie beim Einbau einer durchgängigen Störung wie in Version 4. Diese Änderungen führen zu einer geringeren Einstrommenge, jedoch nicht automatisch etwa auch zu längeren Fließzeiten durch das Oxford.

Als Abbruchkriterium für die Genauigkeit in der Iteration des h-Feldes wurde in den als besonders wesentlich erscheinenden Fällen (in Tab. 2 gekennzeichnet durch ein + über der Versionsnummer) keine Änderung größer als $1 \cdot 10^{-4}$ m in der hydraulischen Höhe für alle Knotenpunkte über mehrere Iterationen angesetzt. Die restlichen Fälle wurden mit einem Abbruchkriterium von maximal $5 \cdot 10^{-4}$ m pro Knotenpunkt innerhalb von 2 Iterationsschritten gerechnet.

Dieses grobe Abbruchkriterium führt zu einem näherungsweise richtigen Strömungsbild abgesehen vom Fließverhalten insbesondere in den tiefliegenden Tonschichten am nördlichen Rand. Es hat zur Folge, daß der Aufbau eines höheren Potentials im Norden gestoppt wird und - wie Vergleichsrechnungen zeigten - im Oxford vorhandene Fließwege darin eher verbleiben als in die umgebenden schwächer durchlässigen Schichten einmünden. Daraus folgen dann zumeist kürzere Laufzeiten für Wasserteilchen, als bei einer genaueren Iteration mit kleinerer Fehlerschranke der Fall wäre. Solange bei genauerer Iteration die Bewegung weiterhin im Oxford verläuft, handelt es sich um eine ca. 10%-Änderung in den Laufzeiten. Die Laufzeiten werden jedoch wesentlich länger, wenn durch weitere Iteration die Tendenz zum Eintritt für Wasserteilchen aus dem Oxford in die schlechter durchlässigen Schichten des Kimmeridge bzw. der Unterkreidetone durch den Aufbau eines höheren Potentials im Norden verstärkt wird.

Eine Ausnahme davon zeigte sich bei der weiteren Iteration von Version 1.2, d.h. einer Version mit sehr schlecht durchlässigen Ton- und Mergelsteinen des Jura und Keuper. Hier verringerte sich durch Nachiteration die Laufzeit etwa um 30 %.

Die Bilanzen zwischen einströmendem und ausströmendem Grundwasser am oberen Modellrand sowie der relative Fehler pro Knotenpunkt zeigen die Genauigkeit der Modellrechnungen an. Tab. 3 enthält diese Angaben für einige der mit einer Schranke von 10^{-4} m gerechneten Fälle, auf die später gesondert eingegangen wird. Die Genauigkeit in den Fällen mit Schranke $5 \cdot 10^{-4}$ m ist natürlich etwas geringer.

Bei den Versionen mit einem Durchlässigkeitsbeiwert von 10^{-12} m/s in den Unterkreidetonen stellt sich auch bei der Iteration mit einem Abbruchkriterium von 10^{-4} m im Bereich des Hilssandsteins ein geringer Fehler ein. Er tritt erst bei einem Durchlässigkeitskontrast von 7 Zehnerpotenzen und gleichzeitig starken Inhomogenitäten auf. Zur Beseitigung dieses Fehlers wäre eine weitere Absenkung beim Abbruchkriterium sowie evtl. eine Verfeinerung des Gitternetzes notwendig. Wegen der kaum merklichen Auswirkung auf das Fließgeschehen wurde hierauf jedoch verzichtet, da diese Maßnahme mit einer Erhöhung des Speicherbedarfs sowie einer unvermeidbaren Erhöhung

Version	Einstrom	Ausstrom	Gesamtbilanzfehler		relativer Fehler pro Knoten $\text{m}^3/\text{a} \cdot 10^{-3}$
	m^3/a	m^3/a	m^3/a	%	
1.1	196,6	196,6	-0,088	0,04	-0,051
1.6	20,15	20,27	-0,120	0,6	-0,069
2.1	19,49	19,45	0,039	0,2	0,024
3.3	183,0	183,2	-0,173	0,09	-0,100
4.1	181,7	181,9	-0,241	0,13	-0,140
4.2	182,5	182,7	-0,160	0,09	-0,093
7.1	189,8	190,8	-0,954	0,5	-0,552
8.1	187,2	187,1	0,239	0,13	0,138
9.1	182,0	181,7	0,328	0,18	0,190

Tab. 3: Mengenbilanzen für einige der gerechneten Versionen

der Rechenzeit verbunden gewesen wäre. Eine Verringerung der Durchlässigkeit des Hilssandsteins um eine Zehnerpotenz, die ebenfalls das Fließgeschehen nur unwesentlich beeinflusst, führte bereits zur Beseitigung des Fehlers (Version 2.1).

Die Ergebnisse der Rechnungen wurden in graphischen Darstellungen aufbereitet. Tabelle 4 enthält eine Übersicht über die in den Anlagen auszugsweise enthaltenen graphischen Darstellungen. Da für Darstellungen der Isolinen der hydraulischen Höhe nur Printplots und einige Farbgraphiken vorliegen, wurden zur Übersicht in Anlage 6 Printplots und Schwarzweißkopien von Farbgraphiken beispielhaft von wenigen Versionen aufgenommen.

Version	Anlagen-Nr.			
	Filterge- schwindigkeiten	Abstandsge- schwindigkeiten	Fließwege und Fließzeiten	Isolinien der hydraulischen Höhe
1.1	3.1	4.1	5.1	6.1
1.2	3.2	4.2	5.2	6.2
1.4	3.3	---	5.3	---
1.5	---	---	5.4	---
1.6	3.4	4.3	5.5	6.3
2.1	3.5	---	5.6	---
3.1	---	---	5.7	---
3.3	3.6	4.4	5.8	---
4.1	---	---	5.9	---
4.2	3.7	4.5	5.10	6.4
5.1	---	---	5.11	---
7.1	3.8	---	5.12	---
8.1	3.9	---	5.13	6.5
9.1	3.10	4.6	5.14	6.6

Tabelle 4: Übersicht über die in den Anlagen enthaltenen graphischen Darstellungen

In den Darstellungen der Filter- und Abstandsgeschwindigkeiten (Anlagen 3 und 4) repräsentieren die Pfeile in der obersten Darstellungsebene mit ihren Vertikalkomponenten nur den hydraulischen Gradienten zwischen den Knotenpunkten mit festgelegten hydraulischen Höhen und den darunter liegenden Knotenpunkten. Daher entspricht die Vertikalkomponente nicht der in dem Punkt, an dem die Pfeile gezeichnet sind.

Zu den Berechnungen der Laufzeiten ist anzumerken, daß einige Versionen bis zum Erreichen der Biosphäre durchgerechnet wurden. In den anderen Fällen wurde jedoch nur bis zum Eintritt in schlechter durchlässige Schichten gerechnet, wenn bis dahin bereits einige Hunderttausend bis Millionen Jahre vergangen waren, oder es wurde direkt ein Abbruchkriterium für die Laufzeitberechnung von 1 Million Jahre verwendet.

6.2 Geschwindigkeitsfelder und Fließwege

Version 1.1:

Grundlage für weitere Betrachtungen ist die als Referenzfall bezeichnete Version 1.1. Das Strömungsfeld im tieferen Untergrund (Anl. 3.1 und 4.1) wird bestimmt durch die im Bereich des Salzgitter-Höhenzugs neugebildeten Grundwässer. Aus den tiefliegenden Aquifern Oberer Muschelkalk und Rhät strömt Wasser kontinuierlich nach oben. Dieses fließt im "Cornbrash" bzw. darüber im Oxford mit nördlicher, aber nach oben gerichteter Strömungskomponente ab. Zusätzliches Potential bezieht das Oxford aus dem Hilssandstein (siehe Anl. 6.1), der an den Muschelkalk-Aquifer angeschlossen ist. Aufgrund der nicht zu geringen Durchlässigkeit der Unterkreidetone sowie des geringeren Potentials im oberflächennahen Grundwasser entsteht ein dauernder Abstrom nach oben aus dem Oxford über den Kimmeridge in die Unterkreidetone.

Daraus ergibt sich, daß im Bereich der Grube Konrad startende Wasserteilchen (Anl. 5.1) nach kurzem Fließweg erst in den Kimmeridge und schließlich in die Unterkreidetone eintreten, wo sie relativ stark gebündelt fast vertikal nach oben gerichtet in die gut wasserleitenden Plänerkalke fließen.

Die Laufzeiten liegen bis zum Erreichen der Plänerkalke bei ca. 800 000 Jahren. Die Abstandsgeschwindigkeiten in den Unterkreidetonen (Anl. 4.1) liegen bei etwa 10^{-3} m/a.

Version 1.2:

Ein gänzlich anderes Bild zeigt sich bei einer Verringerung der Durchlässigkeitsbeiwerte der Ton- und Mergelsteine auf 10^{-12} m/s in Version 1.2. Abgesehen davon, daß hier die Neubildung im Bereich des Salzgitter-Höhen-

zuges zurückgeht, ist der gesamte Potentialaufbau im tieferen Untergrund geändert (Anl. 6.2). Oxford und insbesondere "Cornbrash" wirken als bestimmende Wasserleiter im Fließsystem. Der Potentialabbau des Muschelkalkpotentials erfolgt in den Schichten unterhalb des "Cornbrash". Im Oxford ist das Potential so gering, daß ein Zustrom von oben einsetzt (Anl. 3.2).

Die durchströmende Menge ist relativ gering. Im Oxford existiert nur noch ein sehr geringes Potentialgefälle aus dem Grubenbereich bis hin zum Anschluß an das Quartär im Norden. Die Strömung verläuft mit Abstandsgeschwindigkeiten im Bereich zwischen 10^{-2} und 10^{-1} m/a (Anl. 4.2) im Oxford. Die Fließwege, die von Startpunkten im Grubenbereich ausgehen, verbleiben im Oxford. Die Laufzeiten betragen jedoch mehrere Millionen Jahre bis zum Erreichen der Biosphäre (Anl. 5.2: 2 Millionen Jahre für 24 km im Oxford).

Version 1.4:

Mit Version 1.4 wurde getestet, ob allein die Erhöhung des Durchlässigkeitskontrastes zwischen Oxford und Kimmeridge anders als in Version 1.1 dazu führen würde, daß die Bewegung von Wasserteilchen aus dem Lagerbereich im Oxford verlaufen würde. Das Ergebnis war negativ. Bei geringerem Zustrom von unten (wegen der Erniedrigung der Durchlässigkeiten im Oberen Muschelkalk und Rhät) ergeben sich Fließwege, die gegenüber Version 1.1 erst später das Oxford verlassen. Dann aber fließt das Wasser im Kimmeridge fast vertikal nach oben und tritt in die Unterkreide ein (Anl. 5.3). Das Fließfeld sieht hier vor allem bedingt durch die Durchlässigkeit im "Cornbrash" anders als in Version 1.1 aus (Anl. 3.3). So existieren Bereiche mit einem Zustrom aus dem Oxford in den "Cornbrash". Im Nordteil ergibt sich ferner ein Fließverhalten, bei dem aus dem oberflächennahen Bereich Grundwasser in die tiefliegenden Schichten aufgrund der hydraulischen Verhältnisse einströmt.

Version 1.6:

Neben den Referenzfalldaten waren von Seiten der Hydrogeologie mögliche oder wahrscheinliche Durchlässigkeitswerte angegeben worden. Diese Angaben waren mit Grundlage für die Berechnungen in Version 1.6. Um jedoch das Fließfeld möglichst so zu beeinflussen, daß eine horizontale Bewegung im Oxford bestimmend würde, wurde der Leitfähigkeitskontrast zwischen Oxford und Kimmeridge wie in Version 1.4 gehalten.

Das Fließfeld (Anl. 3.4 und 4.3) sieht dem aus Version 1.1 sehr ähnlich bis auf kleinere Bereiche etwa im Aufstromgebiet im Nordteil. Das zeigt auch die Betrachtung der Isolinien für das hydraulische Potential (Anl. 6.3). Jedoch ist zum einen der Zustrom aus den tiefliegenden durchlässigen Schichten geringer als in Version 1.1 (vergleichbar mit dem Zustrom in Version 1.4). Zum anderen wirkt die überlagernde Tonschicht in Verbindung mit dem Kimmeridge stärker absperrend für den Weg der Wasserteilchen nach oben. Die Folge ist ein verstärkter Durchfluß durch das Oxford mit einer geringeren Tendenz für das Grundwasser, in die schwerer durchlässigen überlagernden Schichten abzufließen. Je nach Startpunkt treten die Wasserteilchen in den Kimmeridge ein oder erreichen den Ausfluß des Oxford unter dem Quartär am Nordrand des Modellgebietes (Anl. 5.5). Für die letztgenannten Wasserteilchen liegen die Laufzeiten im Bereich von 290 000 Jahren.

Versionen 1.3, 1.5, 1.7, 1.8:

Bei den restlichen Versionen zum Referenzmodellschnitt 1. wurde der Einfluß anderer Parametervariationen getestet. Version 1.3 sollte den Einfluß des fehlenden "Cornbrash" bei Version 1.2, gleichzeitig verbunden mit einer Verringerung des Zustroms von unten und einer Vernachlässigung des Kontrasts zwischen Oxford und Kimmeridge zeigen. Das Fließfeld ähnelt dem aus Version 1.2. Nur im Bereich zwischen Oxford und "Cornbrash" dreht sich die Strömung um; d.h. der "Cornbrash" entfällt für den Abstrom von Grundwasser. Die Laufzeiten sind wesentlich länger. Ein Abbruch erfolgte nach 1 Millionen Jahre mit bis dahin 4,5 km Fließweg.

Die bei Version 1.6 angesprochenen wahrscheinlichen Werte bildeten die Grundlage für Version 1.5. Da dabei im wesentlichen alle Schichten um eine Zehnerpotenz erniedrigt wurden - bis auf das Oxford - ist das Fließfeld vergleichbar mit dem aus Version 1.1. Ebenso wie dort ist ein Abstrom der Wasserteilchen aus dem Grubenbereich nach oben festzustellen. Der Aufstieg nach oben erfolgt jedoch im Gegensatz zu Version 1.1 sehr stark gebündelt in einem engen Gebiet. Die Laufzeiten sind eine Zehnerpotenz höher (Anl. 5.4).

Die Rechnungen in den Versionen 1.7 und 1.8 hatten den mehr theoretischen Charakter, den Einfluß einer erhöhten Durchlässigkeit im Oxford, die aus hydrogeologischen und hydraulischen Überlegungen nicht möglich ist (vgl. z.B. /1/), abzuschätzen. Die Fließzeiten sind aufgrund der sonstigen Parameter in der gleichen Größenordnung wie in Version 1.6.

Version 2.1:

Aufgrund der Erfahrungen mit den Rechnungen aus Version 1 zeigte sich, daß eine verringerte Durchlässigkeit in den Unterkreidetonen wesentlich für die Ausbildung einer Fließbewegung durch das Oxford und nicht nach oben durch die Unterkreidete ist. Daher wurde die hydrogeologisch sinnvolle Unterteilung in verschiedenen durchlässige Tone der Unterkreide und des Jura bzw. Keuper (in den Versionen 2, 3, 4, 7, 8 und 9) durchgeführt.

In Version 2.1 wurde zusätzlich versucht, im Gegensatz zum Referenzfall die Durchlässigkeiten entsprechend den wirklichen Transmissivitäten in den Schichten älter als Oxford zu berücksichtigen. Der Hils erhielt aus rechen-technischen Gründen eine geringere Durchlässigkeit.

Das Strömungsbild (Anl. 3.5) sieht dem aus der Referenzfallrechnung sehr ähnlich. Der Abstrom nach oben ist jedoch wesentlich kleiner, die Strömung durch Oxford und Kimmeridge erhöht. Ein Eintritt der aus dem Grubenbereich kommenden Wasserteilchen (Anl. 5.6) in den Kimmeridge erfolgt wesentlich

später. Ein Verlauf der Fließwege im Kimmeridge bis zum Quartär ist nicht ausgeschlossen. Er wurde jedoch nach gerechneten Fließzeiten von 1 Million Jahren nicht weiter verfolgt.

Version 3.1 - 3.4

Die unter Version 3 durchgeführten Rechnungen hatten zum Ziel, einen konservativen Fall bei der zusätzlichen Unterscheidung der Tonschichten herauszufinden. Dazu wurde in Version 3.1 nur die Durchlässigkeit der Unterkreidetone verringert. Das Strömungsbild entspricht im großen und ganzen dem Ergebnis der Rechnung unter Version 2.1. Die Laufzeiten, die sich durch das Oxford und nach dem Eintritt der Wasserteilchen in den Kimmeridge durch diesen bis zum Quartär ergeben, liegen bei 4,5 Millionen Jahren (Anl. 5.7). Diese Größenordnung ist auch in Version 2.1 zu erwarten.

Zur Verstärkung eines Zustroms aus den tieferliegenden Wasserleitern in das Oxford wurde in Version 3.2 eine erhöhte Durchlässigkeit im "Cornbrash" vernachlässigt. Außerdem wurde der Abstrom nach oben in den Kimmeridge erschwert. Der Eintritt von Wasserteilchen erfolgt entsprechend später in den Kimmeridge. Die Laufzeiten bis dahin liegen bei einigen hunderttausend Jahren. Der Fließweg läuft zum Schluß immer durch den Kimmeridge, in dem die Fließgeschwindigkeiten etwa um einen Faktor 100 geringer sind als im Oxford.

In Version 3.3 schließlich wurde der Kimmeridge mit der gleichen Durchlässigkeit versehen wie das Oxford. Diese Beurteilung in den Durchlässigkeiten, d.h. eher Angleichung zwischen Oxford und Kimmeridge als Vergrößerung des Kontrasts, entspricht wahrscheinlich mehr den realen Gegebenheiten. Für die Durchlässigkeit des Rhät und Oberen Muschelkalk wurden geringere Werte gewählt zur Verringerung des Aufbaus eines Gegenpotentials bei gleichzeitig jedoch verkleinertem Einstrom.

Das Strömungsfeld auch dieser Version weicht kaum von dem Bild aus Version 2.1 ab (Anl. 3.6 und 4.4). Die Fließgeschwindigkeiten durch Oxford und Kimmeridge sind geringer als bei Version 3.1 und 3.2 durch das Oxford, da eine geringere Wassermenge durch eine mächtigere durchlässige Schicht fließen kann. Die Fließwege verbleiben in diesem Schichtpaket und die Laufzeiten liegen bei 800 000 Jahren bis zum Erreichen des Quartärs (Anl. 5.8).

Version 3.4 schließlich wurde wie Version 1.7 und 1.8 aus theoretischen Überlegungen mit einem erhöhten hydrogeologisch unrealistischen Durchlässigkeitsbeiwert im Oxford gerechnet. Die Laufzeiten liegen hierbei - wie zu erwarten ist - unter 100 000 Jahren.

Version 4.1 und 4.2

Zur Untersuchung der Auswirkung einer durchgängigen Störung durch Oberen Muschelkalk und Rhät wurden die Versionen 4.1 und 4.2 gerechnet. Geologischer Hintergrund sind die Störungen, die die Wasserleiter z.T. sehr stark gegeneinander versetzen, wie Bleckenstedter und Sauinger Sprung. Dabei ist jedoch ein Kontakt zwischen den versetzten Schichten über Umläufigkeiten und Umsetzungen zwischen den Wasserleitern nicht auszuschließen.

Ein vollkommenes Abschneiden ist als konservativ anzusehen. Dadurch wird ein Zustrom in den Oxford erhöht. Da die leitenden Schichten nach der Störung wieder vorhanden sind, ist eine Tendenz zur Umkehr der Strömungsrichtung in Richtung auf diese Schichten nördlich davon zu erwarten. Der "Cornbrash", der aufgrund seines Ausbisses unter dem Quartär stark auf den Wasserabstrom wirkt, wurde für diese Rechnungen vernachlässigt.

In beiden Versionen stellt sich ein ähnliches, aber von den Versionen 3. im tieferen Teil unterhalb des Oxford stark abweichendes Strömungsfeld ein. Anl. 3.7 und 4.5 zeigen das Strömungsfeld für Version 4.2. Geprägt ist es im mittleren Teil der tiefliegenden Schichten durch eine nach unten gerichtete

tete Strömung in den Tonschichten. Erst im nördlichen Bereich dreht sich die Strömung aus den tiefliegenden Schichten wieder um. Das läßt sich auch in der Darstellung der Isolinien für die hydraulischen Höhen erkennen (Anl. 6.4).

Dieses Strömungsbild führt dazu, daß im Fall von Version 4.1 die im Grubenbereich startenden Wasserteilchen eine nach unten gerichtete Strömungskomponente haben. Die meisten der an verschiedenen Punkten beginnenden Fließwege tauchen deshalb in die tiefer liegenden Tonschichten ab. Die Fließzeiten liegen weit jenseits von 10^6 Jahren (Anl. 5.9).

In Version 4.2 wurden die Daten aus Version 3.3 verwendet. Hier sorgen die in ihrer Durchlässigkeit verringerten Schichten Oberer Muschelkalk und Rhät für eine Verringerung des Abströmeffektes nach unten. Gleichzeitig ist der Bereich des Oxford durch die gleich gut leitende Schicht des Kimmeridge verstärkt worden. Diese Änderung führt dazu, daß außerdem im Nordteil eine Strömung aus den Unterkreidetonen in den Oxford/Kimmeridge-Leiter erfolgt. Die im Bereich der Grube startenden Wasserteilchen haben im wesentlichen die Tendenz dem Lauf des Systems Oxford-Kimmeridge zu folgen (Anl. 5.10). Sie erreichen nach Laufzeiten von kaum über 1 Million Jahre die Biosphäre im Norden.

Versionen 5 und 6

Die Versionen 5 und 6 basieren - wie erwähnt - auf einem älteren vorläufigen Schnitt, bei dem in der modellmäßigen Umsetzung ein direkter - hydrogeologisch nicht denkbarer - Kontakt zwischen "Cornbrash" und Oxford im Süden unterstellt wurde. Bei der unter Version 6.1 durchgeführten Rechnung ergibt sich ein ähnliches Bild wie es aus der Referenzfallrechnung bekannt ist. In den Versionen 5.1 und 6.2 wurde die Tondurchlässigkeit wie bei Version 1.2 behandelt. In Version 5.1 wurde nur der Hilssandstein gegenüber Version 6.2 zusätzlich vom Muschelkalk getrennt.

Es zeigt sich, daß dadurch im Nahbereich des Hilssandsteins und der darunterliegenden Schicht eine leichte Änderung in den hydraulischen Höhen erfolgt. Das hat jedoch kaum eine Auswirkung auf den daran anschließenden Teil des Modells. Ebenso wie in Version 5.1 (siehe Anl. 5.11) verlaufen bei Version 6.2 aufgrund der guten Leitfähigkeit des "Cornbrash" die Fließwege von der Grube über die Kontaktstelle zwischen Oxford und "Cornbrash" in den "Cornbrash". Durch von unten weiter zuströmendes Wasser werden jedoch die meisten Fließwege wieder in die Tone gelenkt. Eine minimale Fließzeit durch den "Cornbrash" bis zur Biosphäre wurde mit ca. 400 000 Jahren ermittelt.

Version 7

Wie in Version 5 für den älteren hydrogeologischen Schnitt sollte in Version 7 noch einmal ein an der Realität orientiertes Abhängen des Hilssandstein vom Oberen Muschelkalk bei gleichzeitiger Anbindung an das oberflächennahe Aquifersystem untersucht werden. Dazu wurde eine Verbindung des Hilssandstein an die Plänerkalke mit einem Durchlässigkeitsbeiwert von 10^{-8} m/s für eingebaut. Das diene als Hilfskonstruktion für den außerhalb des betrachteten Schnitts liegenden Ausbiß des Hilssandstein bei Adersheim. Die Durchlässigkeit des "Cornbrash" wurde leicht erniedrigt, die des Kimmeridge erhöht.

Abgesehen vom Bereich des Hilssandstein sieht das Strömungsbild wieder der Version 3.3 sehr ähnlich (Anl. 3.8). Die direkte Anbindung des Hilssandstein an die Plänerkalke führt dazu, daß kein zusätzlicher Zustrom aus dem Hilssandstein in das Oxford erfolgt; d.h. das Oxford bezieht seinen Zustrom nur noch aus den tiefer liegenden Schichten. Wie in den Versionen 4.2 und 3.3 verlaufen die Fließwege im Oxford-Kimmeridge. Sie erreichen die Biosphäre nach etwa 700 000 Jahren Laufzeit (Anl. 5.12).

Version 8

Aufgrund der Kenntnisse über die verschiedenartige Ausbildung des "Cornbrash" (im Süden war seine Durchlässigkeit in einer Bohrung nicht von der der umgebenden Tone zu unterscheiden, im Norden ist er bekannt als Wasserleiter) wurde in dieser Version versucht, dieser Kenntnis gerecht zu werden.

Er wurde daher im Südteil mit einem Durchlässigkeitsbeiwert von 10^{-9} m/s, im Nordteil mit 10^{-7} m/s berücksichtigt. Der zweite Grund war, im Süden einen verstärkten Zustrom von unten in das Oxford zu ermöglichen und im Norden den Aufbau eines Gegenpotentials zu verkleinern. Der Durchlässigkeitsbeiwert von 10^{-9} m/s für den Kimmeridge sollte für eine möglichst im Oxford verlaufende Strömung sorgen.

Im Fließfeld und in den Isolinien für die hydraulischen Höhen zeigt sich der Effekt des unterteilten "Cornbrash" mit der Abwärtsbewegung in den Schichten unterhalb des Oxford dort, wo die höhere Durchlässigkeit im "Cornbrash" einsetzt (Anl. 3.8 und 6.5). Die Verminderung des Gegenpotentials durch die erhöhte Durchlässigkeit des "Cornbrash" reicht jedoch nicht aus, den Eintritt der Fließwege in den Kimmeridge zu unterbinden. Wegen der sehr geringen Durchlässigkeit gehen hier die Laufzeiten in den 10^6 Jahre Bereich über (Anl. 5.13).

Version 9

Die mit Version 4.2 (Störung) und Version 8.1 (unterteilter Cornbrash) durchgeführten Rechnungen zeigten eine Tendenz für eine konservative Betrachtung auf, der mit Version 9 - der Verbindung beider Versionen - nachgegangen wurde.

Die Isolinien der hydraulischen Höhen zeigen ein Bild, das stark durch die Störung bedingt ist (Anl. 6.6). Es stellt sich ein Strömungsbild ein (Anl. 3.10 und 4.6), das im Südteil aufgrund der Störung einen starken Zustrom

in das Oxford signalisiert. Die weiter nördlich wieder vorhandenen tiefen Wasserleiter sorgen für einen leichten Abstrom aus dem Oxford in die tiefer liegenden Schichten. Der im südlichen Teil wieder gut durchlässige Cornbrash führt zu einem verstärkten Abstrom aus den tieferen Schichten und wirkt dem Aufbau eines erhöhten Potentials entgegen.

Aufgrund dieser Ausbildung des Strömungsfeldes erfolgt die Ausbreitung (Anl. 5.14) für die im unteren Grubenbereich startenden Wasserteilchen zuerst über das Oxford. Sie tauchen dann jedoch nach unten ab. Die weiter oben im Grubenbereich beginnenden Fließwege verbleiben im Oxford und erreichen mit Laufzeiten um 240 000 Jahren das Quartär am Nordrand.

Laufzeiten für Wasserteilchen aller Versionen

Die Ergebnisse bezüglich der Laufzeiten und Fließwege lassen sich tabellarisch zusammenfassen in Tabelle 5. Dabei sind nur die Versionen aufgenommen worden, bei denen realistische Durchlässigkeitsbeiwerte für das Oxford verwendet wurden. Die Rechnungen aus Version 6, die nur abschätzenden Charakter hatten, sind ebenfalls nicht enthalten.

Version	minimale Laufzeit in 10^3 a	Austrittsbereich	Fließweg über
1.1	808	Plänerkalk	Kimmeridge, Unterkreidetone
1.2	> 2000	-	Oxford
1.3	> 1000	-	Kimmeridge
1.4	> 1000	-	Kimmeridge, (Doggertone)
1.5	7263	Grenze Plänerkalke / Ton	Kimmeridge, Unterkreidetone
1.6	289	Quartär	Oxford, z.T. Kimmeridge
2.1	> 1000	-	Kimmeridge
3.1	4412	Quartär	Kimmeridge
3.2	> 500	-	Kimmeridge
3.3	841	Quartär	Kimmeridge
4.1	> 1000	-	Kimmeridge, Doggertone
4.2	> 1000	(Quartär)	Kimmeridge, (Doggertone)
5.1	464	Quartär	Cornbrash
7.1	690	Quartär	Kimmeridge
8.1	> 1000	-	Kimmeridge
9.1	240	Quartär	Oxford, (Doggertone)

Tabelle 5: Laufzeiten, Austrittsbereiche und Fließwege

7. Anmerkungen zu Diffusion und Dispersion

Bei den sehr geringen Geschwindigkeiten, insbesondere bei der Ausbreitung in den Tonen ist z.T. von einem eher diffusiv als konvektiv bestimmten Transport von Teilchen auszugehen. Das gilt nicht für die Ausbreitung durch das Oxford oder bei entsprechenden Durchlässigkeitsverhältnissen durch den Kimmeridge. Hier dürfte der konvektive Transport wesentlich größer sein als der diffusive. Dafür ist bei diesen Ausbreitungsvorgängen die Dispersion von zusätzlicher Bedeutung. Schwierigkeiten bereitet jedoch dabei das Festsetzen einer der Realität nahekommenden Dispersivität.

Für einige Fälle wurde der Einfluß von Diffusion und Dispersion mit Hilfe einer eindimensionalen analytischen Lösung abgeschätzt /4/.

Es handelt sich um die Lösung von

$$R \frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \frac{\partial C}{\partial x}$$

mit den Rand- und Anfangsbedingungen

$$C = C_0, \quad x = 0, \quad t > 0$$

$$C = 0, \quad x > 0, \quad t = 0$$

$$\frac{\partial C}{\partial x} = 0, \quad x \rightarrow \infty, \quad t > 0$$

$$\text{und } D = D_0 + \alpha |v|.$$

Dabei sind (v,x wie vorher)

- C Konzentration
- C_0 Anfangskonzentration
- R Retardationsfaktor
- D Dispersionskoeffizient

D_0 Diffusionskonstante
 α Dispersivität
 t Zeit.

Die Lösung lautet:

$$C(x,t) = C_0 \cdot \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{Rx - vt}{\sqrt{4RDt}} \right) + \exp \left(\frac{v x}{D} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{Rx + vt}{\sqrt{4RDt}} \right) \right].$$

Diffusionseffekt

Aufgrund der niedrigen Geschwindigkeiten im Ton bei Version 1.1 kann angenommen werden, daß bei diesen Versionen der Transport entweder diffusionsbestimmt ist oder mindestens in gleicher Größenordnung durch Diffusion und Konvektion erfolgt.

Angesetzt wurde zur Abschätzung der Diffusion eine Diffusionskonstante von

$$D_0^1 = 5 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s} \text{ bzw. } D_0^2 = 7,5 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}.$$

Die Werte wurden etwas geringer als die Diffusionskonstante von Cl^- in freiem Wasser gewählt. Sie liegen im Bereich von Werten, die experimentell als Diffusionskonstanten in Tonschichten bestimmt wurden /2/. Bei der Berechnung wird eine permanente Konzentration $C_0 = 1$ im Bereich des Grubengebäudes unterstellt. Die Mächtigkeit der Tonschicht, durch die die Diffusion abzulaufen hat, wurde mit 600 m angenommen. Eine starke Auswirkung hat bei den Ergebnissen, daß das Fortschreiten der Diffusionsfront abhängig vom Gradienten ist.

Es zeigt sich (Anl. 7 enthält die gerechneten Daten), daß nach 200 000 Jahren die Front mit $1 \cdot 10^{-4}$ % der Anfangskonzentration bei 390 m (D_0^1) bzw.

480 m (D_0^2) angekommen ist. Nach 400 000 Jahren ist bei D_0^1 die Front mit $1 \cdot 10^{-4} \% \cdot C_0$ erst bei 540 m angelangt, bei D_0^2 existiert dann eine Konzentration von $1,2 \cdot 10^{-3} \% \cdot C_0$ am Austrittspunkt bei 600 m. Dazu benötigt man im Fall D_0^1 noch weitere 200 000 Jahre.

Diese Angaben dürfen nicht überinterpretiert werden. Sie zeigen jedoch, daß durch die Diffusion etwa gleiche Laufzeiten von Teilchen anzusetzen sind, wie sie durch den konvektiven Transport in Version 1.1 gegeben sind. Daraus ergäbe sich insgesamt eine minimale Laufzeit von wenigen 100 000 Jahren für die Ausbreitung in Version 1.1.

Dispersionseffekt

Zur Abschätzung des Einflusses der Dispersion unabhängig von den in den einzelnen Versionen ermittelten Abstandsgeschwindigkeiten im Oxford wurde der folgende Ansatz gewählt. Ausgehend von den Abschätzungen im Kapitel 3 wurde eine Filtergeschwindigkeit von 0,01 m/a durch das Oxford zugrunde gelegt. Diffusion wurde berücksichtigt mit $D_0 = 5 \cdot 10^{-10}$ (m/s).

Aufgrund der geringen Geschwindigkeiten wurde die Dispersivität α mit $\alpha_1 = 1$ m bzw. $\alpha_2 = 10$ m angenommen. Aus der mittleren Abstandsgeschwindigkeit von 0,50 m/a folgt, daß die mittlere Laufzeit für 35 km bei 70 000 Jahren liegt. Es wurde daher bis zu 70 000 Jahren gerechnet.

Für $\alpha_1 = 1$ m folgt dann (Anl. 8.1): Nach 70 000 Jahren ist der mittlere Durchgangspunkt ($0,5 \cdot C_0$) bei 35 km. Die aufgrund von Dispersion voreilende Konzentration hat bei 36 km einen Wert von $1 \cdot 10^{-2} \% \cdot C_0$ erreicht. Die Streubreite meßbarer Konzentration liegt etwa 1 - 2 km um den mittleren Durchgangspunkt.

Bei $\alpha_1 = 10$ m ändert sich dieses Bild (Anl. 8.2). Hier ist bereits nach 60 000 Jahren, eine leichte Konzentrationsfront bei 33 km angekommen. Der

mittlere Durchgangspunkt liegt bei 30 km. Es ergibt sich also ein ungefähres Voreilen um 10 % der Weglänge. Bezogen auf die Laufzeit heißt das, daß die minimale Laufzeit etwa 10 % geringer ist als die mittlere Laufzeit.

Eine größere Dispersivität als 10 m, wie sie im 2. Fall angesetzt wurde, ist relativ unwahrscheinlich. Daher kann von einer Streubreite um die mittlere Laufzeit durch das Oxford von etwa 10 % näherungsweise ausgegangen werden.

Bei dieser Abschätzung bleibt zu berücksichtigen, daß die angesetzte Porosität von 2 % zwar für die Abschätzung der Abstandsgeschwindigkeit anzusetzen ist, daß aber bei diffusiven und dispersiven Prozessen auch der Anteil des immobilen Wassers eine Rolle spielt. D.h., daß bei diesen Berechnungen eine höhere Porosität evtl. nahe der Gesamtporosität (ca. 20 % im Oxford) anzusetzen wäre. Das würde den Effekt von Dispersion und Diffusion auf die Laufzeit wieder reduzieren wie auch Abschätzungen mit der verwendeten analytischen Lösung zeigen.

8. Bewertung

Bei den im Rahmen möglicher Bandbreiten durchgeführten Parametervariationen für die Durchlässigkeitsbeiwerte zeigt sich eine sehr starke Abhängigkeit der Ergebnisse vom vorgegebenen Ensemble der Durchlässigkeitswerte für die einzelnen Rechnungen.

Es ist daher ausgesprochen schwierig, den konservativen Fall aus allen sinnvollen hier nur für einige Fälle durchgeführten Parameterkombinationen herauszufinden. Es läßt sich jedoch eine klare Tendenz absehen, aus der sich zwei wesentliche, als konservativ anzusehende Fälle ergeben.

Zum einen ist es die unter anderem durch den Referenzfall Version 1.1 gegebene Situation, bei der die Aufwärtsbewegung so stark ist, daß nach mehr

oder minder kurzer Zeit ein Eintritt der im Grubenbereich gestarteten Wasserteilchen über den Kimmeridge in die Unterkreidetone erfolgt. Dabei stellt Version 1.1 bereits den als konservativ zu bezeichnenden Fall mit Laufzeiten von ca. 700 000 Jahren dar. Diese Laufzeiten sind im wesentlichen durch die Mächtigkeit der Tonschichten bestimmt.

Im zweiten Fall, etwa gegeben durch Version 1.6, ist die hydrogeologische Situation so, daß das Fließen vom Grubenbereich in Richtung Norden erfolgt. Dabei erreicht ein großer Teil der gestarteten Wasserteilchen den Austrittspunkt aus dem Oxford in das Quartär im Bereich des Salzstockes Calberlah. Die Laufzeiten liegen bei 180 000 Jahren. Ähnliche Ergebnisse zeigt Version 9.1, bei der versucht wurde, eine möglichst konservative hydrogeologische Situation einzubauen.

Zwischen diesen beiden Versionen existieren alle möglichen weiteren Parameterkombinationen. Dabei ist der Eintritt vom Oxford in den Kimmeridge irgendwo auf dem Weg nach Norden möglich. Abhängig von den Durchlässigkeitsbeiwerten im Kimmeridge und den Unterkreidetonen verlaufen dann die Fließwege entweder über den Kimmeridge bis zum Ausbiß im Quartär oder über die Unterkreidetone zur Biosphäre. Die Laufzeiten werden jedoch um ein vielfaches länger als bei den vorher beschriebenen zwei Fällen.

Neben diesen Möglichkeiten gibt es auch bei verschiedenen Parameterkombinationen Fälle, bei denen Wasserteilchen nach unten abströmen. Ausgenommen von den nur zu Testzwecken - da hydrogeologisch unrealistisch - durchgeführten Versionen 5 und 6, bei denen aufgrund des "Cornbrash"-Anschlusses an das Oxford die Fließwege z.T. mit leicht geringeren Laufzeiten durch den "Cornbrash" verlaufen, führen diese Fließwege zu sehr großen Laufzeiten.

Nimmt man nun Diffusions- und Dispersionsvorgänge zu dieser Betrachtung hinzu, so ergibt sich daraus für die zwei "konservativen" Fälle folgendes: Im ersten Fall handelt es sich mindestens um einen zu gleichen Teilen diffusiven wie konvektiven Transport. Die Diffusion könnte hier, abhängig vom Diffusionskoeffizienten bewirken (- wobei zusätzlich örtlich geringere Ton-

Überdeckungen zum Grubenbereich existieren -), daß sich Teilchenlaufzeiten in der gleichen Größenordnung ergeben wie im zweiten Fall. Damit reduziert sich die berechnete Laufzeit um mehr als 50 % auf einige hunderttausend Jahre.

Beim zweiten Fall kann die Diffusion aber keinen ausschlaggebenden Effekt haben. Es handelt sich um einen konvektiv-dispersiv bestimmten Transport. Legt man die getroffene Abschätzung für den dispersiven Effekt zugrunde, wäre eine Laufzeit um etwa 20 % geringer möglich.

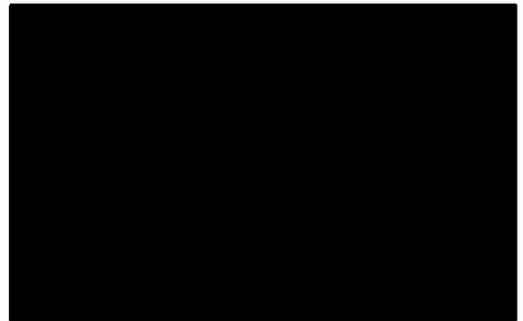
Es folgt, daß bei beiden Fällen aufgrund der zweidimensionalen Modellrechnungen verbunden mit den Überlegungen zu Diffusion und Dispersion von einer Laufzeit von etwa 200 Tausend Jahren im Minimum ausgegangen werden kann. Es mag sein, daß durch eine dreidimensionale Betrachtung, bei der einige Strukturen anders eingehen, diese Laufzeiten sich noch geringfügig verkürzen oder auch verlängern. Legt man dabei den größtmöglichen Gradienten zugrunde (siehe auch Kapitel 3), so ist eine Laufzeit von unter 100 000 Jahren bei den vorgegebenen Parametern und aufgrund vorhandener Inhomogenitäten jedoch kaum vorstellbar.

BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE

Im Auftrage:



Sachbearbeiter:



9. Literaturverzeichnis

- /1/ Delisle, G., Giesel, W. & Schildknecht, F. (1986): Zur Abschätzung der Durchlässigkeit des Oxford um die Grube Konrad. - BGR-Bericht, Archiv-Nr. 99132
- /2/ Desaulniers, D.E., Cherry, J.A. & Gillham, R.W. (1984): Hydrogeologic analysis of long term solute migration in thick clayey quaternary deposits. - Proc. Int. Groundwater Symposium, Vol. II: p. 349-356, Montreal
- /3/ Hüser, M. & Neumann-Redlin, C. (1986): Hydrogeologie Konrad - Hydrogeologische Grundlagen der Modellrechnungen zur Langzeitsicherheit. - BGR-Bericht, Archiv-Nr. 99131
- /4/ Lapidus, L. & Amundson, N.R. (1952): Mathematics of adsorption in beds. VI. The effect of longitudinal diffusion in ion exchange and chromatographic columns. - J. Phys. Chem, 56: 984-988
- /5/ Schelkes, K. & Giesel, W. (1985): Hydraulische Höhe, Fließgeschwindigkeiten und Fließzeiten in einem Grundwasserleiter, der von einer schlechter durchlässigen Schicht überlagert wird - Einige analytische Lösungen der hierfür maßgeblichen Differentialgleichung -. BGR-Bericht, Archiv-Nr. 98470.

10. Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abb. 1: Lage des hydrogeologischen Übersichtsprofils

Abb. 2: Hydrogeologisches Übersichtsprofil durch das Modellgebiet

Abb. 3: Für die Modellrechnungen verwendeter näherungsweise Verlauf der hydraulischen Höhe im Modellschnitt

Abb. 4: Modell-Schichtverteilung in einem Vertikalschnitt im Untersuchungsgebiet Konrad - Referenzfall

Tab. 1: Durchlässigkeitsbeiwerte und effektive Porositäten (hydrogeologische Vorgabe aus /3/)

Tab. 2: Durchlässigkeitsbeiwerte aller gerechneten Versionen

Tab. 3: Mengenbilanzen für einige der gerechneten Versionen

Tab. 4: Übersicht über die in den Anlagen enthaltenen graphischen Darstellungen

**Anlage 1: Analytische Abschätzung zu Fließgeschwindigkeiten
und Laufzeiten mit Angaben zu den Durchflußmengen**

Verwendete Einheiten:

Mächtigkeiten, Breiten und Längen in Meter

Laufzeiten in Jahren

Geschwindigkeiten in Meter/Jahr

Durchlässigkeiten in Meter/Jahr

Durchflußmengen in Kubikmeter/

durchflossene Fläche und Jahr

PROGRAMM AVZSCH

ERGÄNZEDATEN :

ART DER VERMENDETEN LÖSUNG : 1
 RECHTIGKEIT DER UNTEREN SCHICHT : 0.100E+01
 WÄCHTIGKEIT DER OBEREN SCHICHT : 0.500E+01
 DURCHLAUSSIGKEITSBESTWERT UNTERE SCHICHT : 0.315E+01
 DURCHLAUSSIGKEITSBESTWERT OBERE SCHICHT : 0.410E+02
 PERZENTIVE POROSITÄT UNTERE SCHICHT : 0.200E+01
 PERZENTIVE POROSITÄT OBERE SCHICHT : 0.100E+00
 VORGEDEHNE HYDRAULISCHE HOHE : 0.100E+01
 LÄNGE DES BETRACHTETEN SYSTEMS : 0.390E+05
 BREITE DES BETRACHTETEN SYSTEMS : 0.100E+01

ERGEBNIS DER BERECHNUNG :

ABSTAND VON X=0 A	HYDR. HOHE h(X)	FILTER- GESCHW. v(X)	ABSTANDS- GESCHW. V(X)	FILTER- GESCHW. v(X)	ABSTANDS- GESCHW. V(X)	ABSTANDS- GESCHW. VZ(X)	LAUFZEIT HORIZONTAL- T(X)	LAUFZEIT VERTIKAL TZ(X)	LAUFZEIT GESAMT TG(X)
0.000E+00	0.100E+02	0.500E-01	0.203E+01	0.524E-01	0.324E+02	0.000E+00	0.153E+06	0.153E+06	0.153E+06
0.500E+00	0.573E-02	0.275E-01	0.133E+01	0.353E-03	0.334E+02	0.180E+04	0.223E+04	0.227E+04	0.227E+04
0.900E+00	0.951E+00	0.133E-01	0.337E+00	0.242E-03	0.242E+02	0.446E+04	0.331E+04	0.336E+04	0.336E+04
0.700E+00	0.812E-02	0.127E-01	0.537E+00	0.794E-03	0.164E+02	0.336E+04	0.483E+04	0.495E+04	0.495E+04
0.100E+01	0.112E-02	0.688E-02	0.633E+02	0.111E-03	0.111E+02	0.141E+03	0.717E+04	0.733E+04	0.733E+04
0.150E+01	0.144E-02	0.590E-02	0.295E+00	0.754E-04	0.754E+03	0.225E+05	0.109E+07	0.109E+07	0.109E+07
0.210E+01	0.933E+01	0.277E-02	0.133E+00	0.342E-04	0.342E+03	0.357E+05	0.137E+07	0.141E+07	0.141E+07
0.240E+01	0.277E-01	0.127E-02	0.752E+01	0.226E-04	0.226E+03	0.342E+03	0.242E+07	0.242E+07	0.242E+07
0.270E+01	0.154E-01	0.112E-02	0.366E+01	0.145E-04	0.145E+03	0.145E+03	0.337E+07	0.351E+07	0.351E+07
0.300E+01	0.154E-01	0.102E-02	0.313E+01	0.391E-05	0.613E+04	0.851E+04	0.167E+09	0.929E+07	0.945E+07
0.330E+01	0.759E-02	0.342E-03	0.421E+01	0.400E-05	0.400E+04	0.400E+04	0.333E+04	0.200E+03	0.202E+03
0.360E+01	0.000E-03	0.733E-03	0.372E+01	0.600E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.307E+04	0.100E+26	0.100E+26

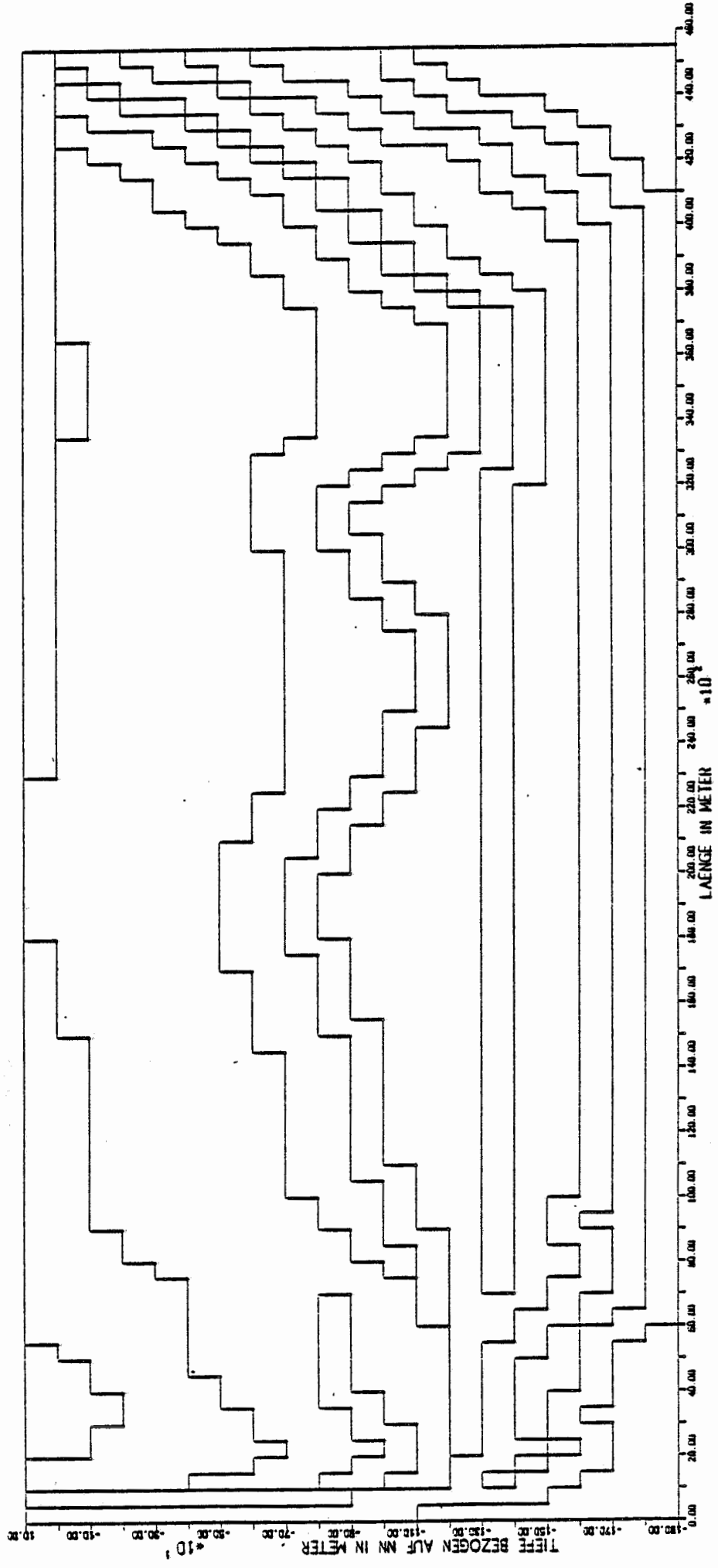
ERSTES UNTERE SCHICHT SEE Y=0 : 0.603E+01

AUSSTICH UNTERE SCHICHT SEE X=1 : 0.733E+01

ABSTAND AUS DER UNTEREN IN DER OBEREN SCHICHT
 ZWISCHEN X=0 UND X=1

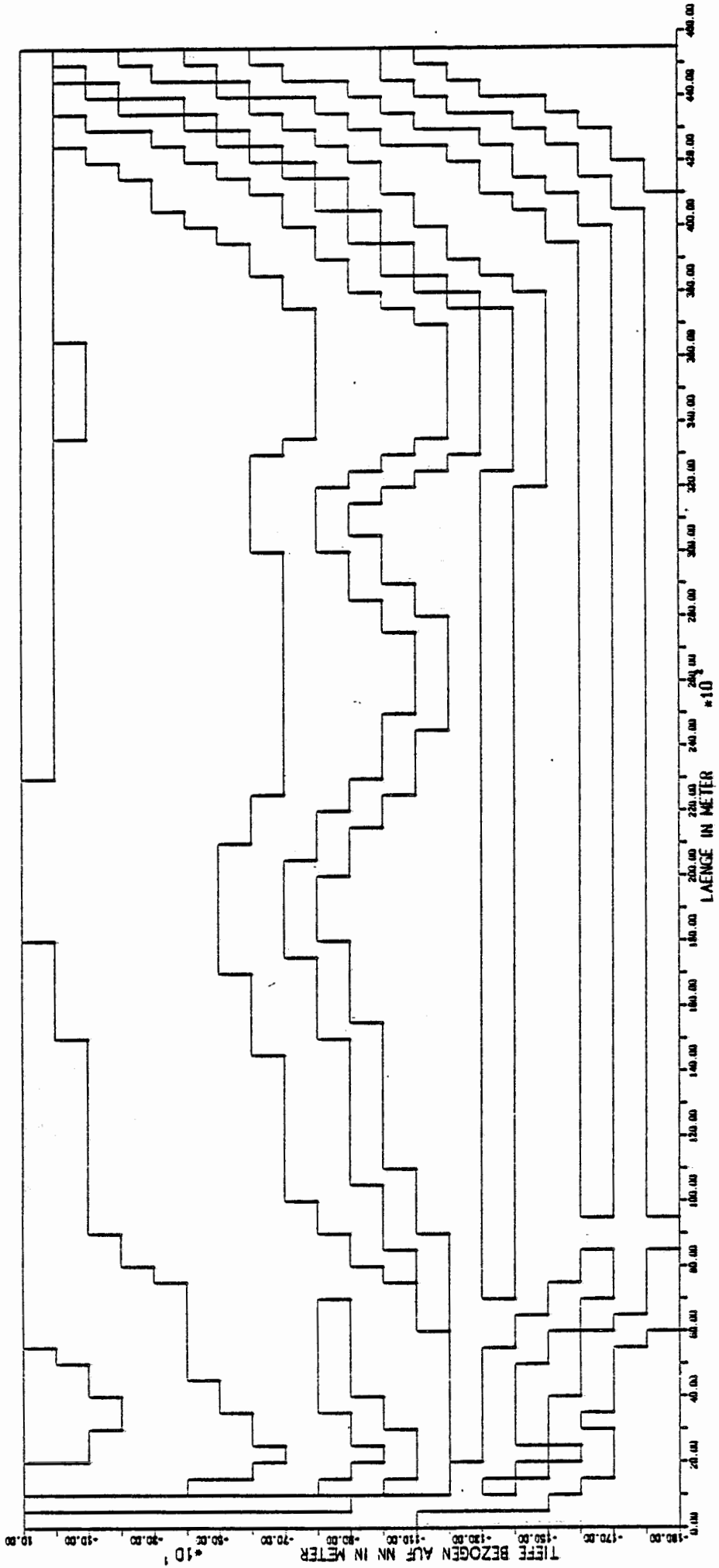
ABSTAND	ABSTROMENGE
0.000E+00	0.100E+01
0.500E+00	0.335E+00
0.900E+00	0.601E+00
0.700E+00	0.504E+00
0.100E+01	0.279E+00
0.150E+01	0.137E+00
0.210E+01	0.126E+00
0.240E+01	0.342E+01
0.270E+01	0.551E+01
0.300E+01	0.342E+01
0.330E+01	0.342E+01
0.360E+01	0.150E+01
0.390E+01	0.150E+01

**Anlage 2: Modellschnitte für die verschiedenen geologisch
unterschiedlichen Versionen**



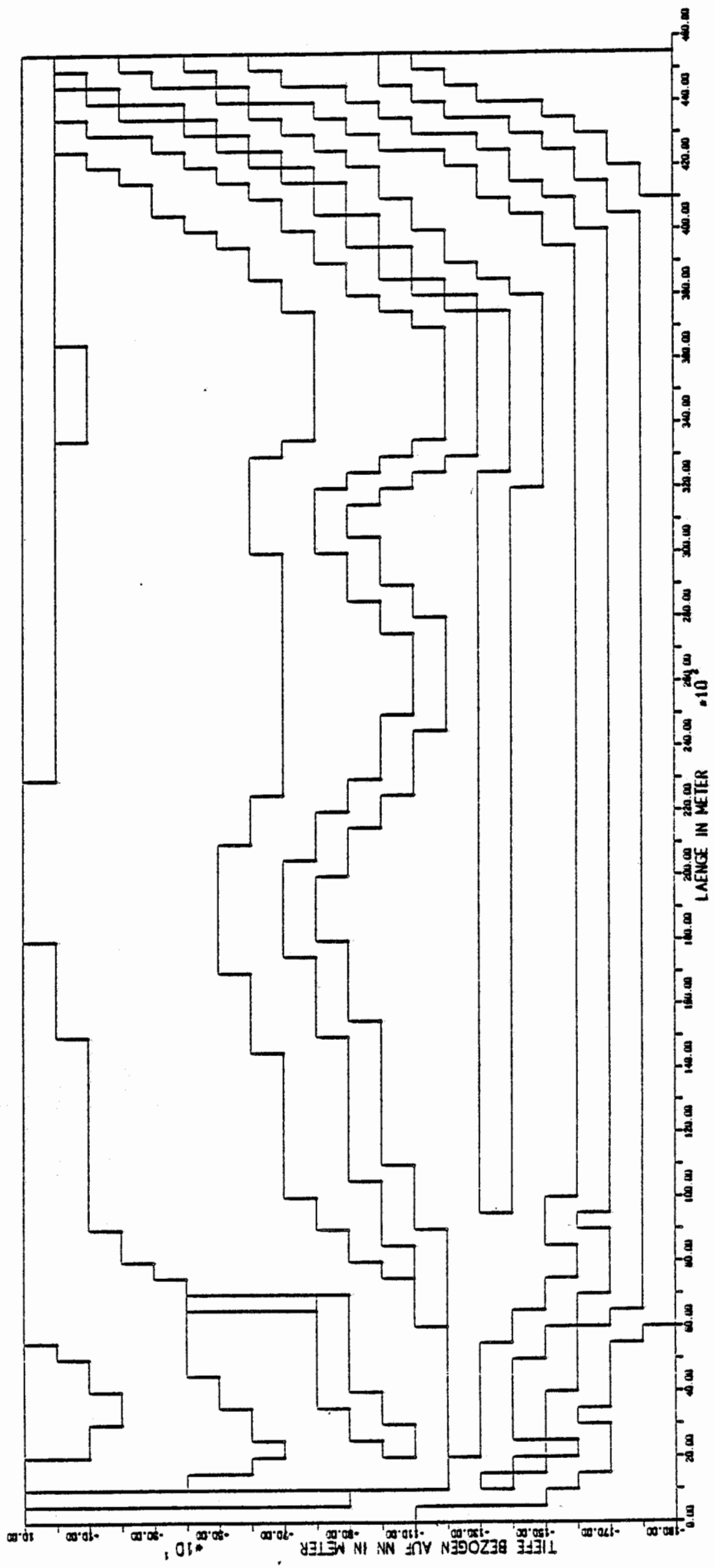
MODELL-SCHICHTVERTEILUNG IN EINEM VERTIKALSCHNITT IM UNTERSUCHUNGSGBIET KONRAD

VERSION 3.0



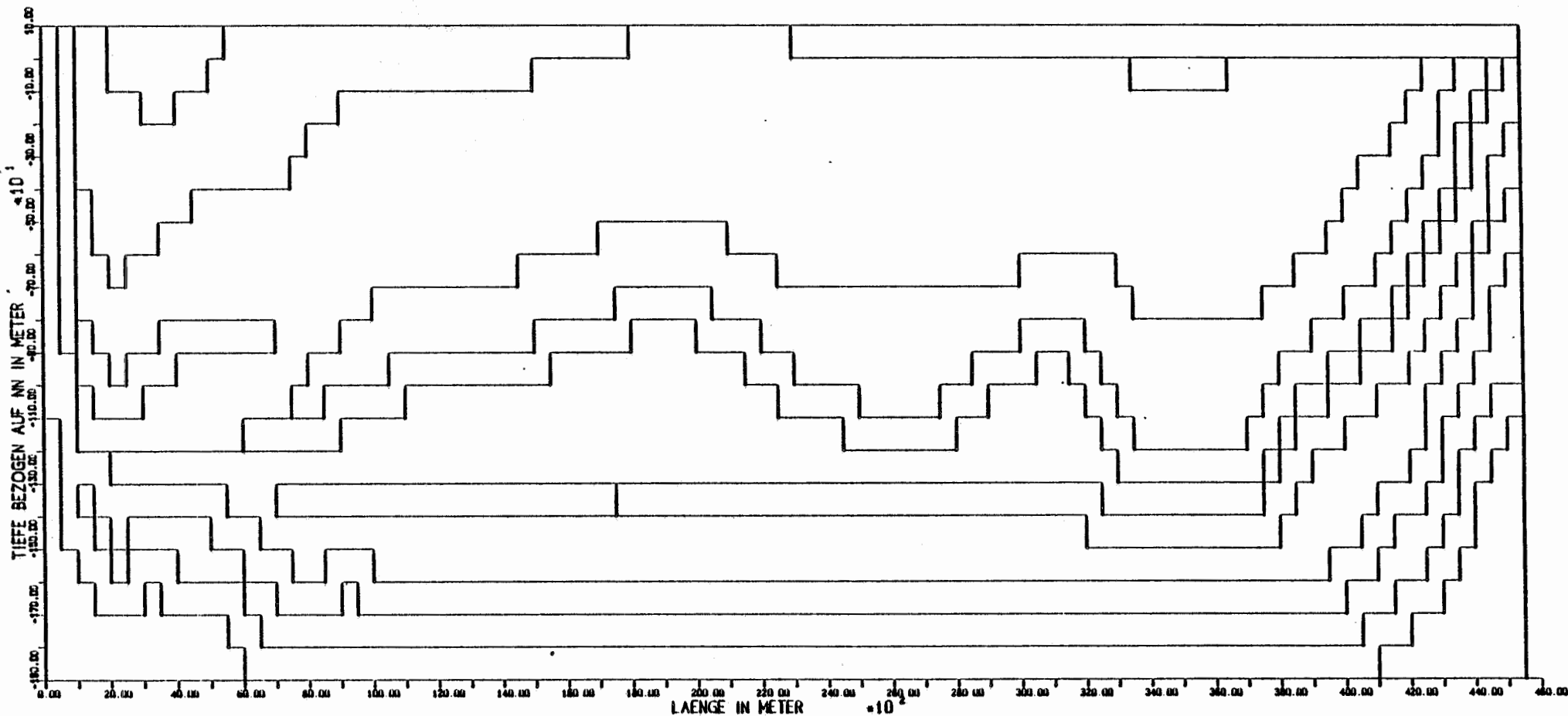
MODELL-SCHICHTVERTEILUNG IN EINEM VERTIKALSCHNITT IM UNTERSUCHUNGSGEBIET KONRAD

VERSION: 4.0

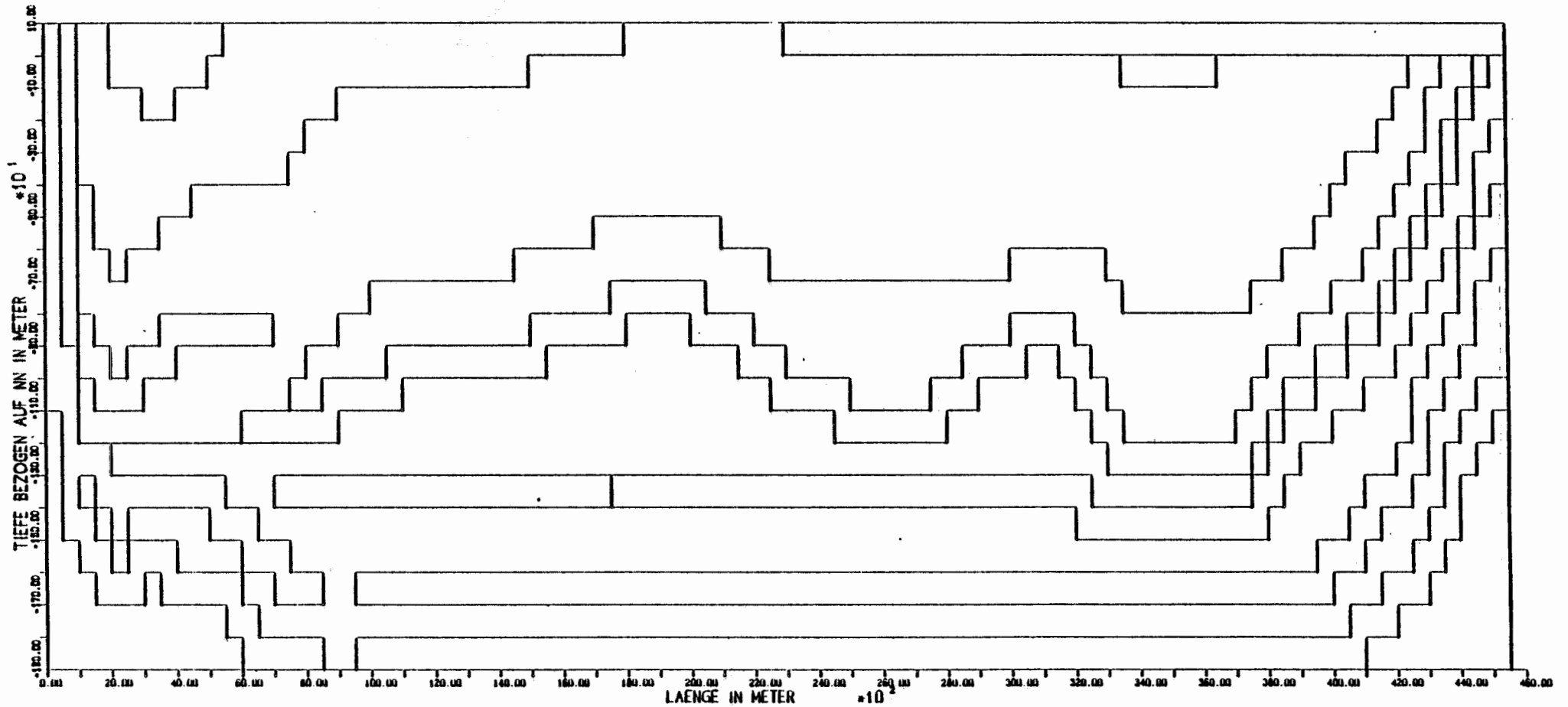


MODELL-SCHICHTVERTEILUNG IN EINEM VERTIKALSCHNITT IM UNTERSUCHUNGSGEBIET KONRAD

VERSION: 7.0



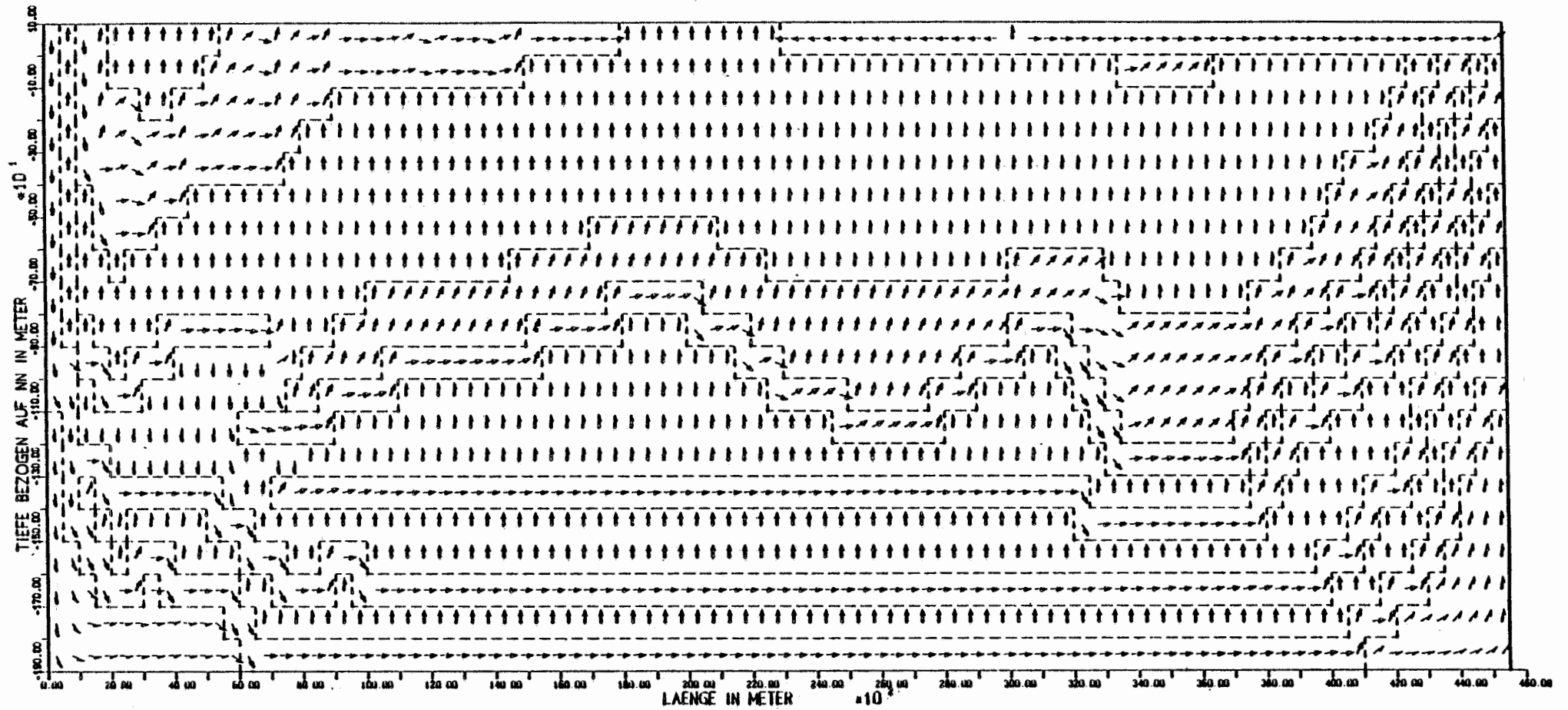
MODELL-SCHICHTVERTEILUNG IN EINEM VERTIKALSCHNITT IM UNTERSUCHUNGSGEBIET KONRAD
 VERSION: 8.0



MODELL-SCHICHTVERTEILUNG IN EINEM VERTIKALSCHNITT IM UNTERSUCHUNGSGEBIET KONRAD

VERSION: 9.0

Anlage 3: Filtergeschwindigkeitsfelder



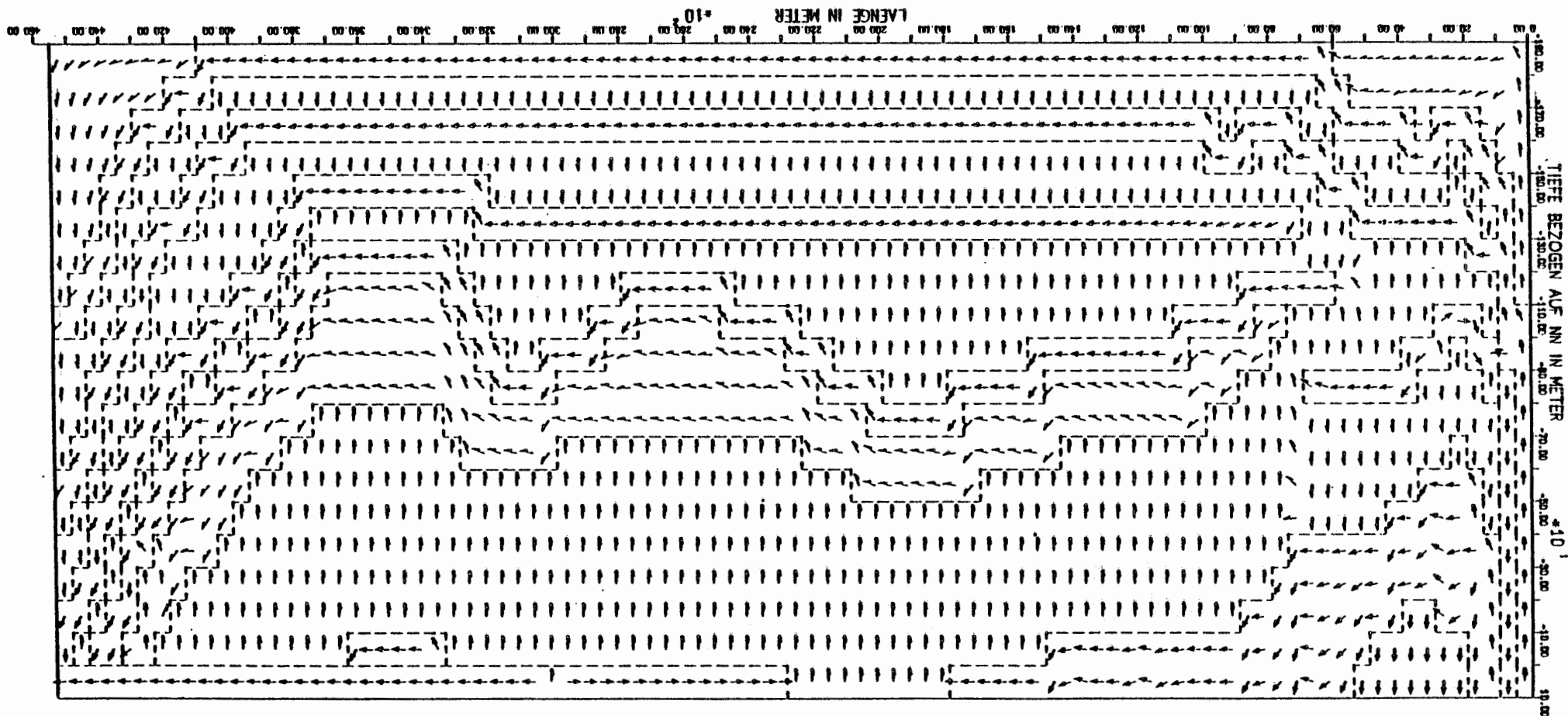
↑	1.E -02	M..3/(A..M..2)	V -	1.E +00	(M..3/(A..M..2))
↑	1.E -03	M..3/(A..M..2)	- V -	1.E -01	(M..3/(A..M..2))
↑	1.E -04	M..3/(A..M..2)	- V -	1.E -02	(M..3/(A..M..2))
↑	1.E -05	M..3/(A..M..2)	- V -	1.E -03	(M..3/(A..M..2))
↑	1.E -06	M..3/(A..M..2)	- V -	1.E -04	(M..3/(A..M..2))
↑			- V -	1.E -05	(M..3/(A..M..2))
↑			- V -	1.E -06	(M..3/(A..M..2))

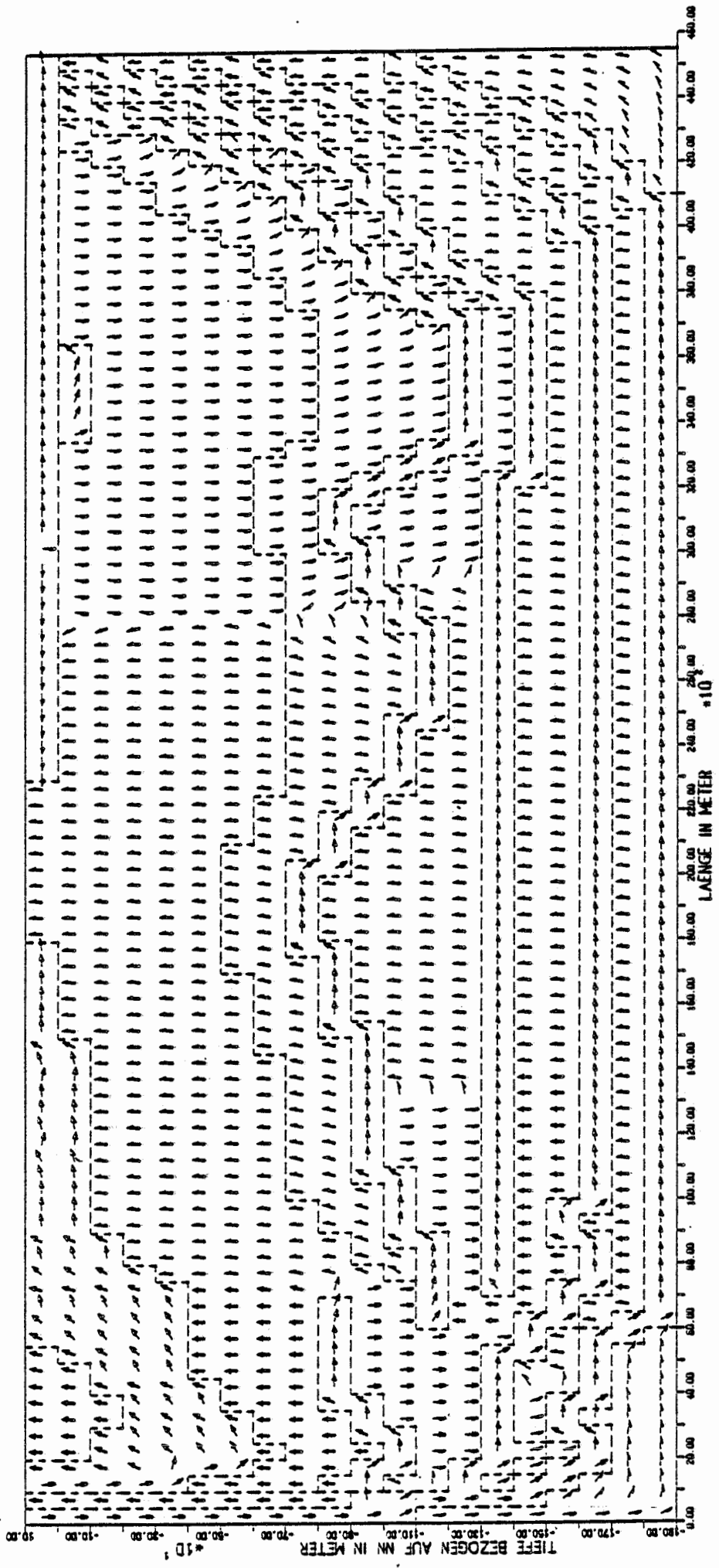
FILTERGESCHWINDIGKEITEN

VERSION: 1.1

FILTERGESCHWINDIGKEITEN

1.E-00	BH.3/VA.M.21	A	-	1.E
1.E-01	BH.3/VA.M.21	A	-	1.E
1.E-02	BH.3/VA.M.21	A	-	1.E
1.E-03	BH.3/VA.M.21	A	-	1.E
1.E-04	BH.3/VA.M.21	A	-	1.E
1.E-05	BH.3/VA.M.21	A	-	1.E
1.E-06	BH.3/VA.M.21	A	-	1.E

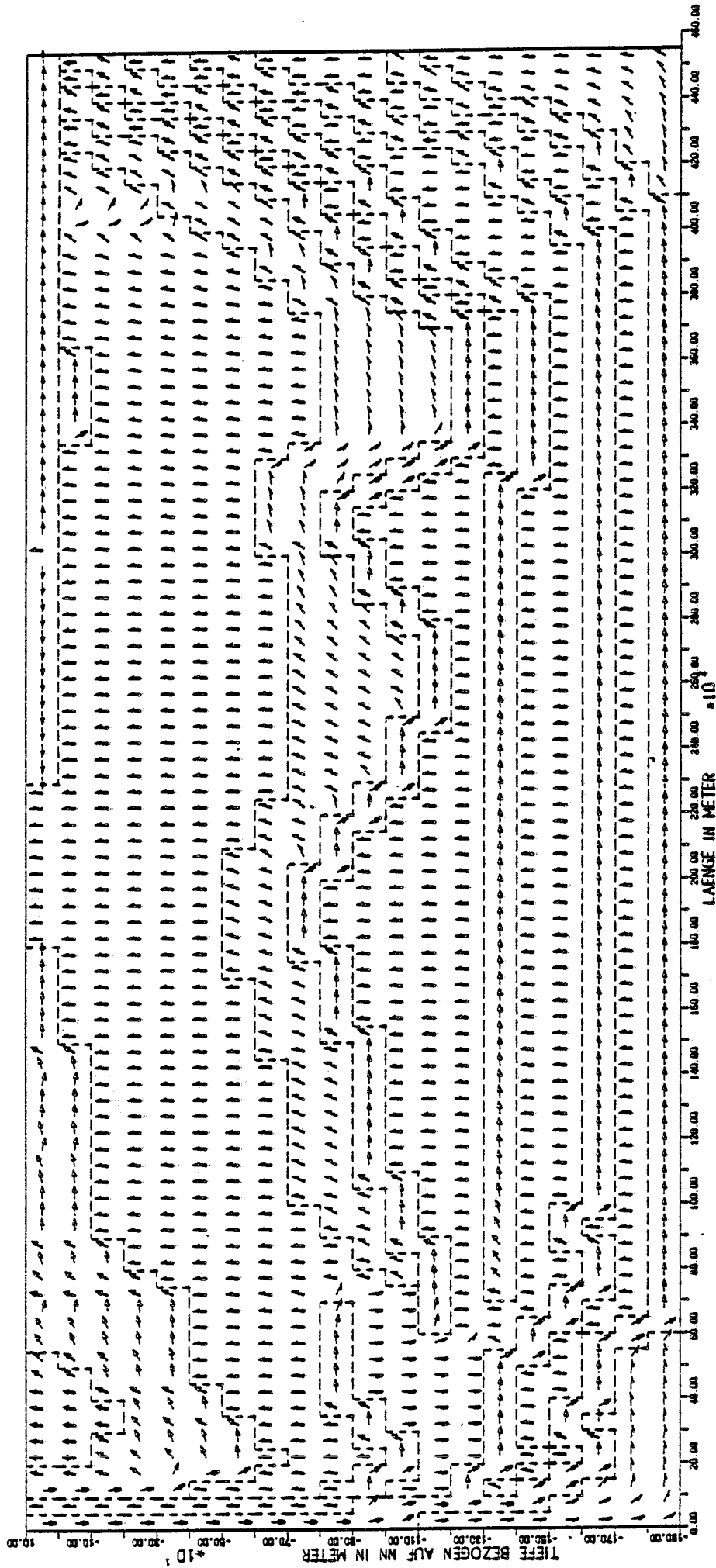




- 1+E -02 (M+3/(A+M+2))
- 1+E -03 (M+3/(A+M+2))
- 1+E -04 (M+3/(A+M+2))
- 1+E -05 (M+3/(A+M+2))
- 1+E -06 (M+3/(A+M+2))
- V -00 (M+3/(A+M+2))
- V -01 (M+3/(A+M+2))
- V -02 (M+3/(A+M+2))
- V -03 (M+3/(A+M+2))
- V -04 (M+3/(A+M+2))
- V -05 (M+3/(A+M+2))
- V -06 (M+3/(A+M+2))

FILTERGESCHWINDIGKEITEN

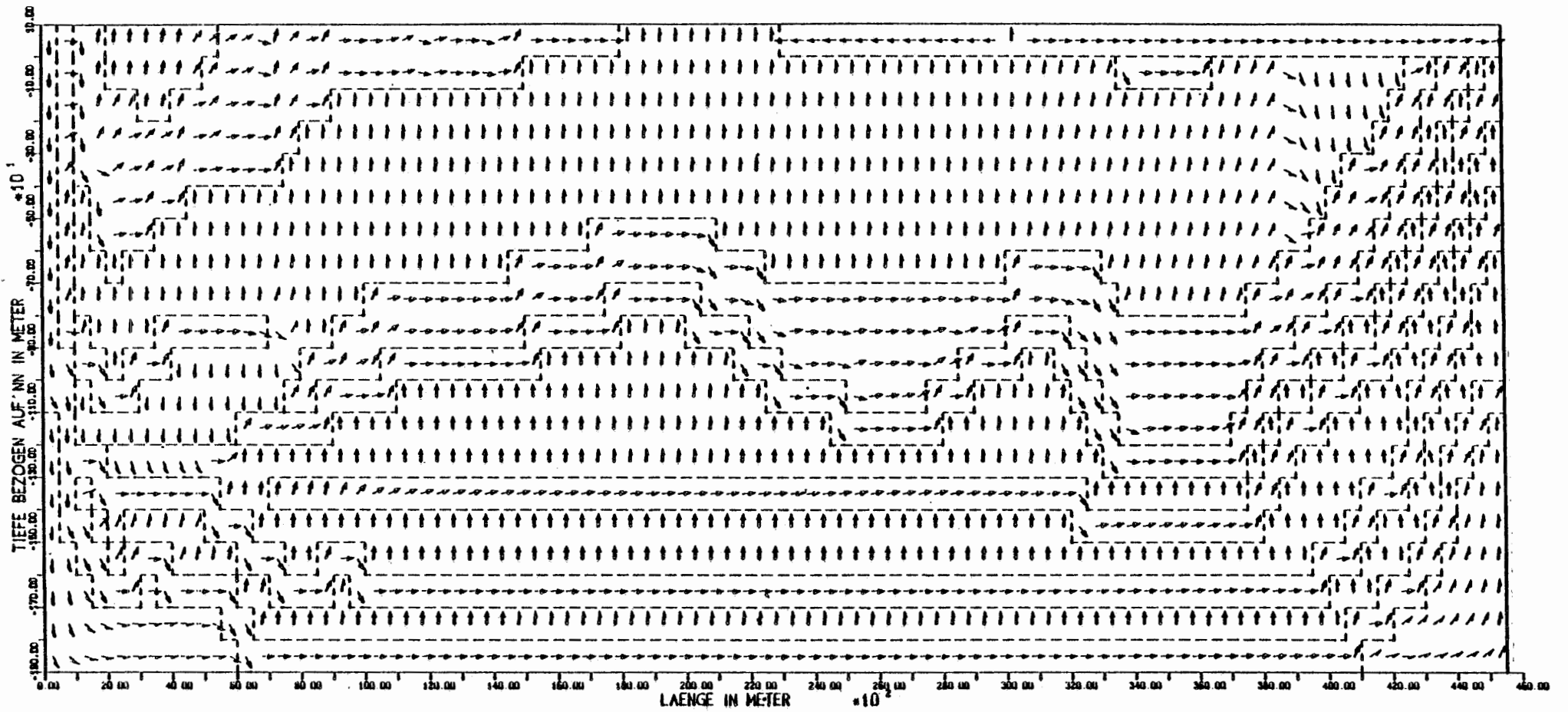
VERSION: 1.4



- 1+E -02 (M+3/(A+M+2)) V · 1+E -00 (M+3/(A+M+2))
- 1+E -03 (M+3/(A+M+2)) V · 1+E -01 (M+3/(A+M+2))
- 1+E -04 (M+3/(A+M+2)) V · 1+E -02 (M+3/(A+M+2))
- 1+E -05 (M+3/(A+M+2)) V · 1+E -03 (M+3/(A+M+2))
- 1+E -06 (M+3/(A+M+2)) V · 1+E -04 (M+3/(A+M+2))
- 1+E -07 (M+3/(A+M+2)) V · 1+E -05 (M+3/(A+M+2))
- 1+E -08 (M+3/(A+M+2)) V · 1+E -06 (M+3/(A+M+2))

FILTERGESCHWINDIGKEITEN

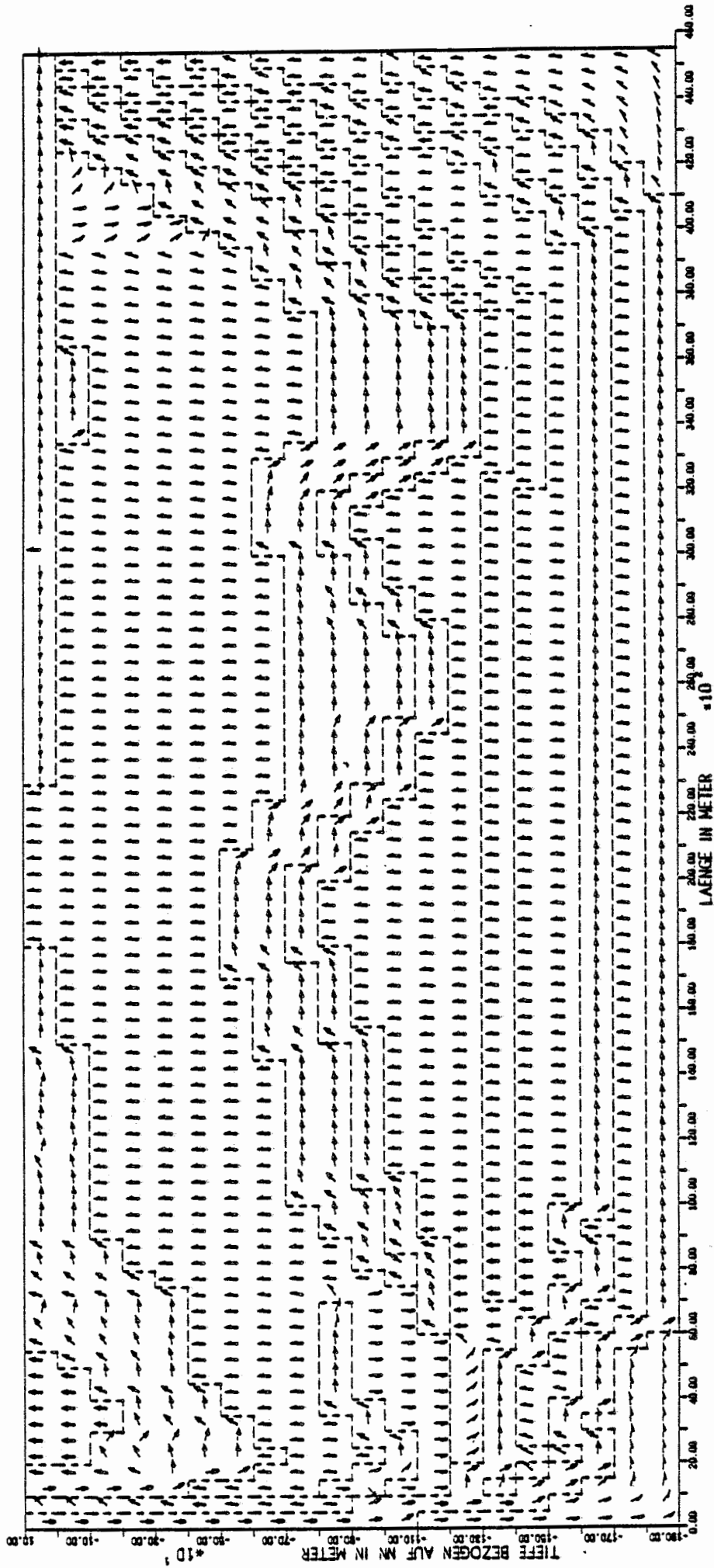
VERSION: 1.6



↓	1+E -03 (M=3/I=H=2)	V -	1+E -01 (M=3/I=H=2)
↓	1+E -04 (M=3/I=H=2)	· V -	1+E -02 (M=3/I=H=2)
↓	1+E -05 (M=3/I=H=2)	· V -	1+E -03 (M=3/I=H=2)
↓	1+E -06 (M=3/I=H=2)	· V -	1+E -04 (M=3/I=H=2)
↓	1+E -07 (M=3/I=H=2)	· V -	1+E -05 (M=3/I=H=2)
↓		· V -	1+E -06 (M=3/I=H=2)
↓		· V -	1+E -07 (M=3/I=H=2)

FILTERGESCHWINDIGKEITEN

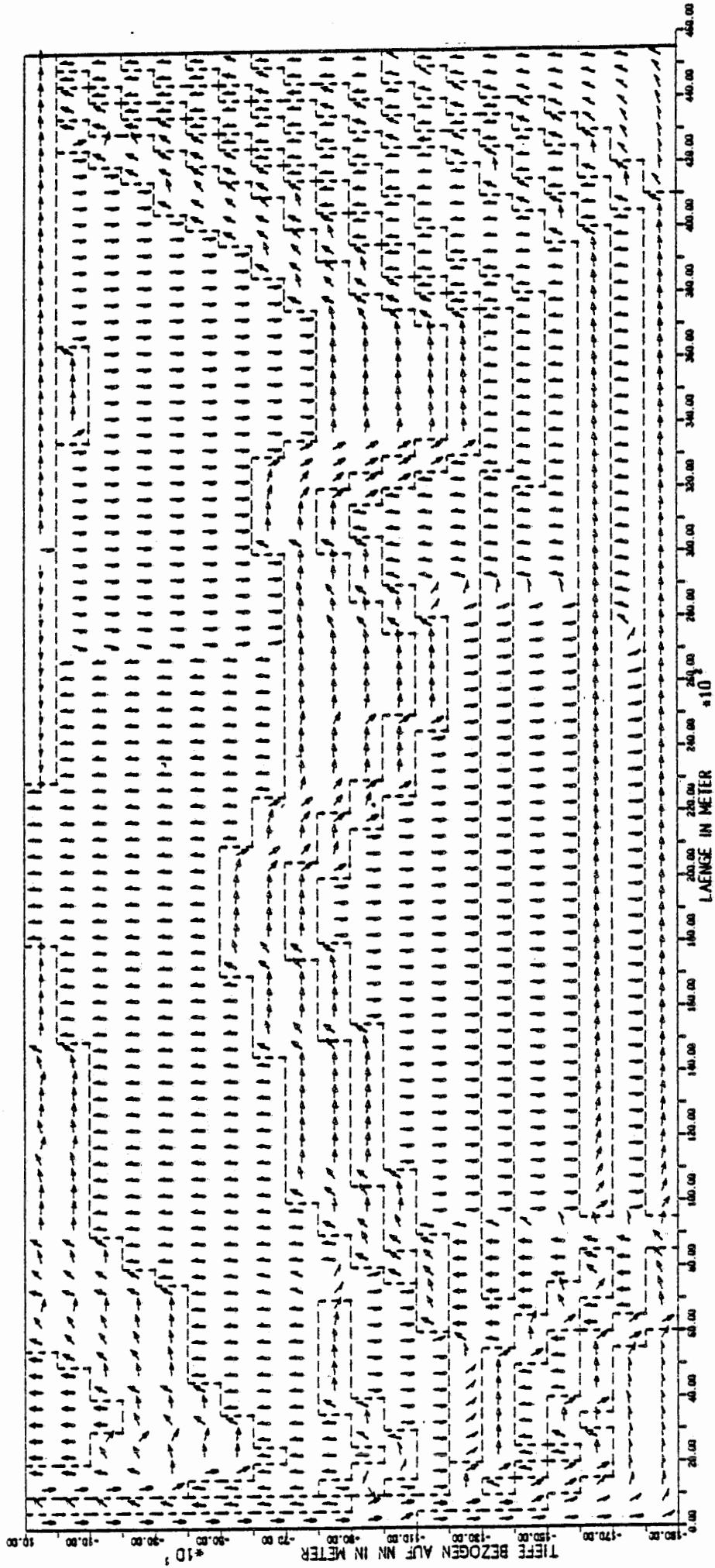
VERSION: 2.1



- 1-E -02 M=3/(A-M=2) V · 1-E ·00 M=3/(A-M=2)
- 1-E -03 M=3/(A-M=2) V · 1-E -01 M=3/(A-M=2)
- 1-E -04 M=3/(A-M=2) V · 1-E -02 M=3/(A-M=2)
- 1-E -05 M=3/(A-M=2) V · 1-E -03 M=3/(A-M=2)
- 1-E -06 M=3/(A-M=2) V · 1-E -04 M=3/(A-M=2)
- 1-E -06 M=3/(A-M=2) V · 1-E -05 M=3/(A-M=2)
- 1-E -06 M=3/(A-M=2) V · 1-E -06 M=3/(A-M=2)

FILTERGESCHWINDIGKEITEN

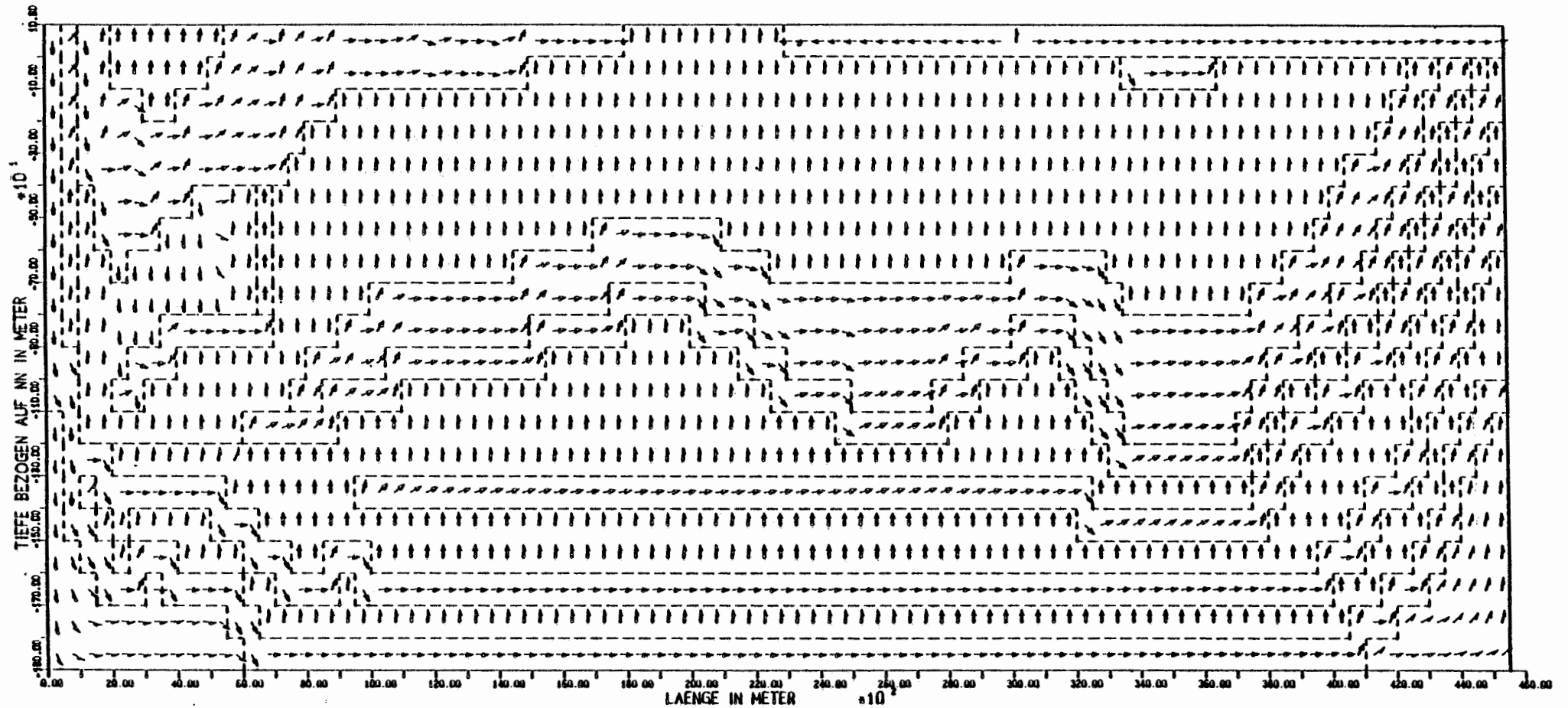
VERSION 3.3



- 1-E -02 M...3/(A...21) V • 1-E -00 M...3/(A...21)
- 1-E -03 M...3/(A...21) V • 1-E -01 M...3/(A...21)
- 1-E -04 M...3/(A...21) V • 1-E -02 M...3/(A...21)
- 1-E -05 M...3/(A...21) V • 1-E -03 M...3/(A...21)
- 1-E -06 M...3/(A...21) V • 1-E -04 M...3/(A...21)
- 1-E -06 M...3/(A...21) V • 1-E -05 M...3/(A...21)
- 1-E -06 M...3/(A...21) V • 1-E -06 M...3/(A...21)

FILTERGESCHWINDIGKEITEN

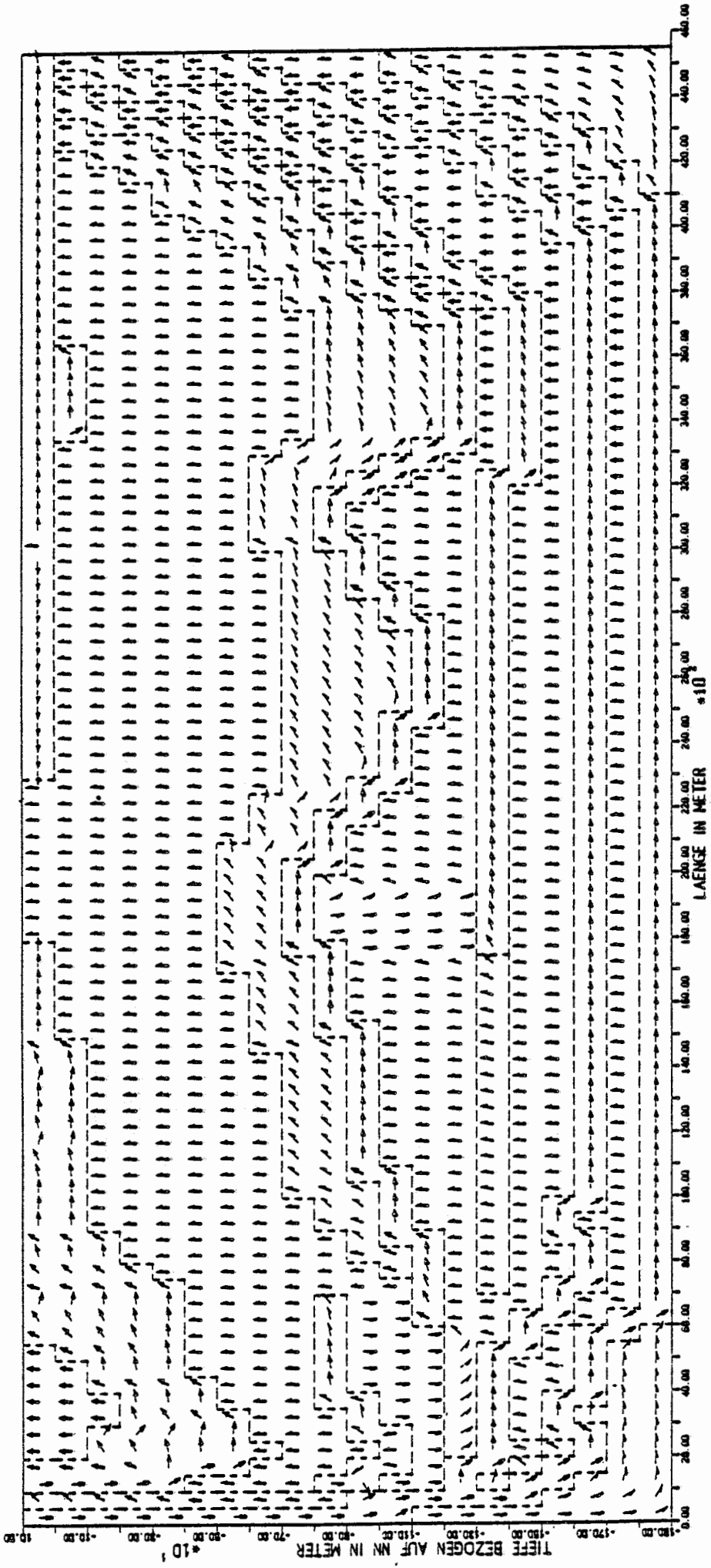
VERSION: 4.2



↑	1.E -02	(M+3/(A+H+2))	V -	1.E -00	(M+3/(A+H+2))
↑	1.E -03	(M+3/(A+H+2))	- V -	1.E -01	(M+3/(A+H+2))
↑	1.E -04	(M+3/(A+H+2))	- V -	1.E -02	(M+3/(A+H+2))
↑	1.E -05	(M+3/(A+H+2))	- V -	1.E -03	(M+3/(A+H+2))
↑	1.E -06	(M+3/(A+H+2))	- V -	1.E -04	(M+3/(A+H+2))
↑			- V -	1.E -05	(M+3/(A+H+2))
↑			- V -	1.E -06	(M+3/(A+H+2))

FILTERGESCHWINDIGKEITEN

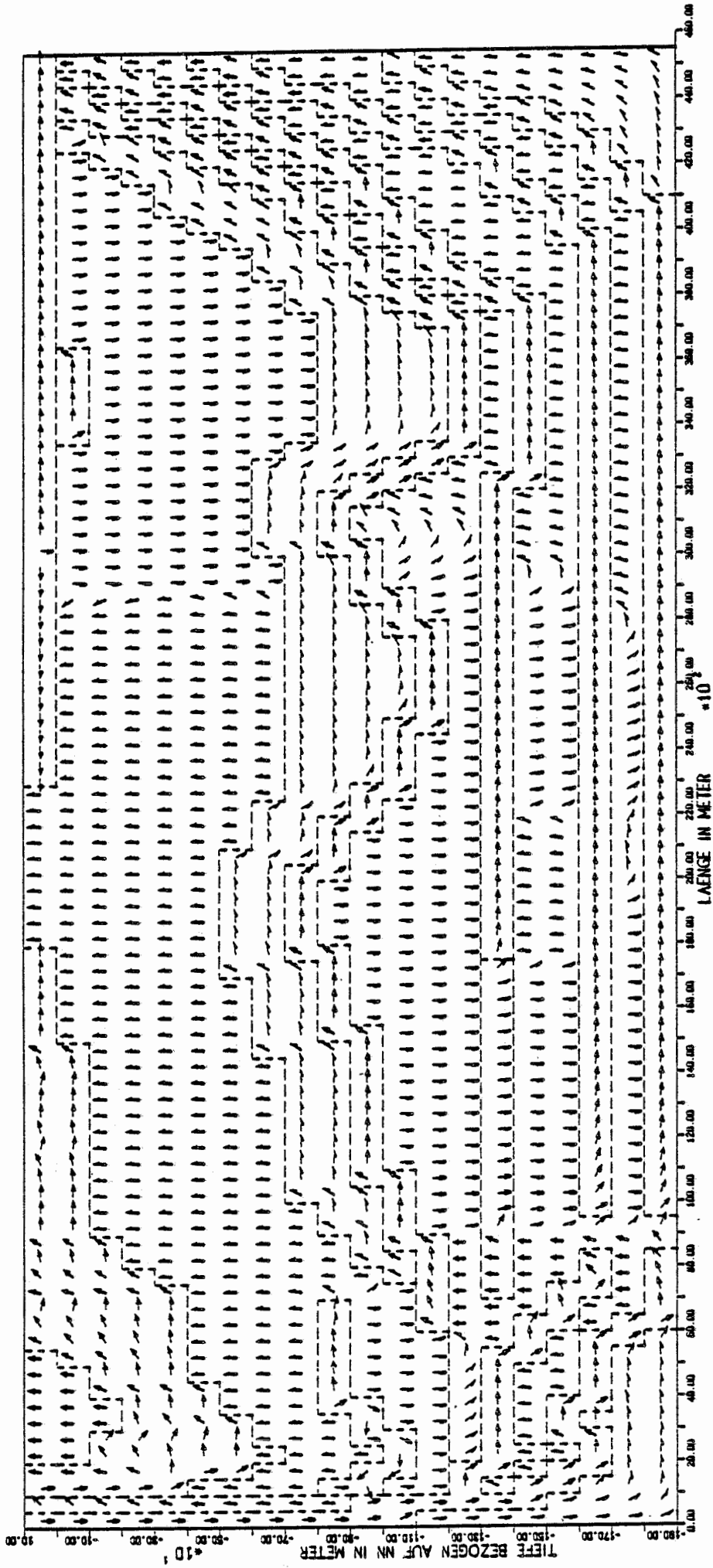
VERSION: 7.1



- ↑ 1-E -02 (M...3/(A...M...2)) V · 1-E -00 (M...3/(A...M...2))
- ↑ 1-E -03 (M...3/(A...M...2)) · V · 1-E -01 (M...3/(A...M...2))
- ↑ 1-E -04 (M...3/(A...M...2)) · V · 1-E -02 (M...3/(A...M...2))
- ↑ 1-E -05 (M...3/(A...M...2)) · V · 1-E -03 (M...3/(A...M...2))
- ↑ 1-E -06 (M...3/(A...M...2)) · V · 1-E -04 (M...3/(A...M...2))
- ↑ 1-E -07 (M...3/(A...M...2)) · V · 1-E -05 (M...3/(A...M...2))
- ↑ 1-E -08 (M...3/(A...M...2)) · V · 1-E -06 (M...3/(A...M...2))

FILTERGESCHWINDIGKEITEN

VERSION: 8.1

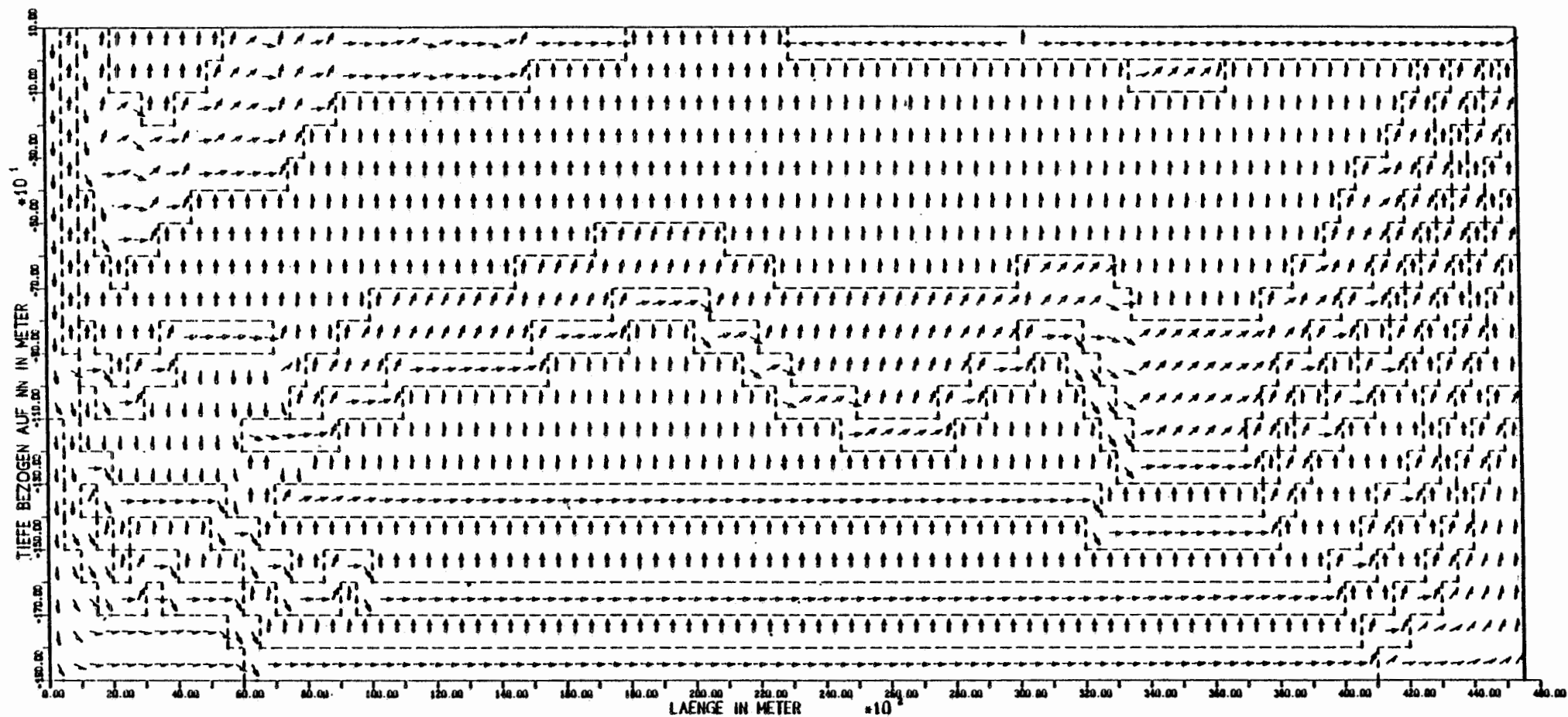


- 1+E -02 M...3/A...21
- 1+E -03 M...3/A...21
- 1+E -04 M...3/A...21
- 1+E -05 M...3/A...21
- 1+E -06 M...3/A...21
- 1+E -00 M...3/A...21
- 1+E -01 M...3/A...21
- 1+E -02 M...3/A...21
- 1+E -03 M...3/A...21
- 1+E -04 M...3/A...21
- 1+E -05 M...3/A...21
- 1+E -06 M...3/A...21

FILTERGESCHWINDIGKEITEN

VERSION: 9.1

Anlage 4: Abstandsgeschwindigkeitsfelder



↑		V	·	1·E	-01	M/A1
↑	1·E	-01	M/A1	·	V	·
↑	1·E	-02	M/A1	·	V	·
↑	1·E	-03	M/A1	·	V	·
↑	1·E	-04	M/A1	·	V	·
↑	1·E	-05	M/A1	·	V	·
↑		V	·	1·E	-00	M/A1
		V	·	1·E	-01	M/A1
		V	·	1·E	-02	M/A1
		V	·	1·E	-03	M/A1
		V	·	1·E	-04	M/A1
		V	·	1·E	-05	M/A1

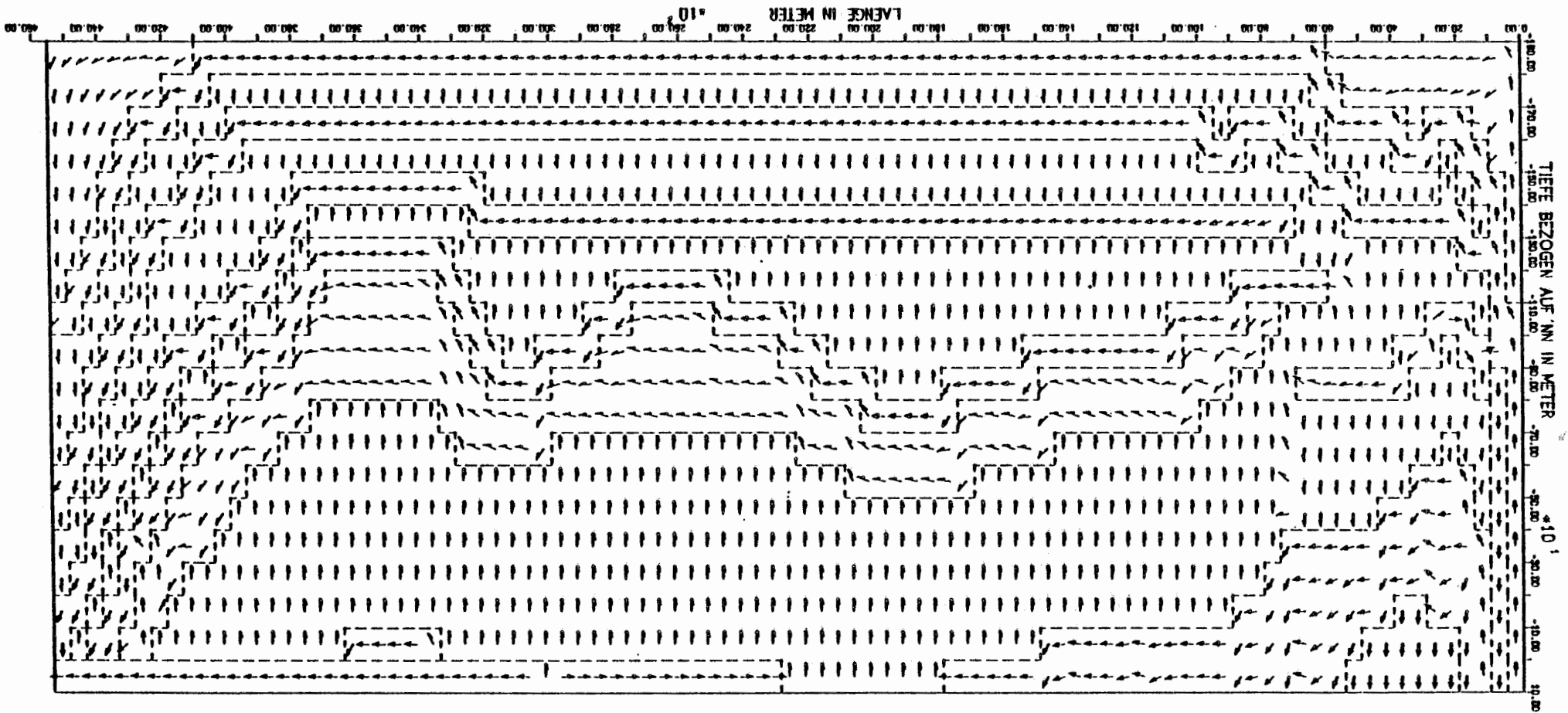
ABSTANDSGESCHWINDIGKEITEN

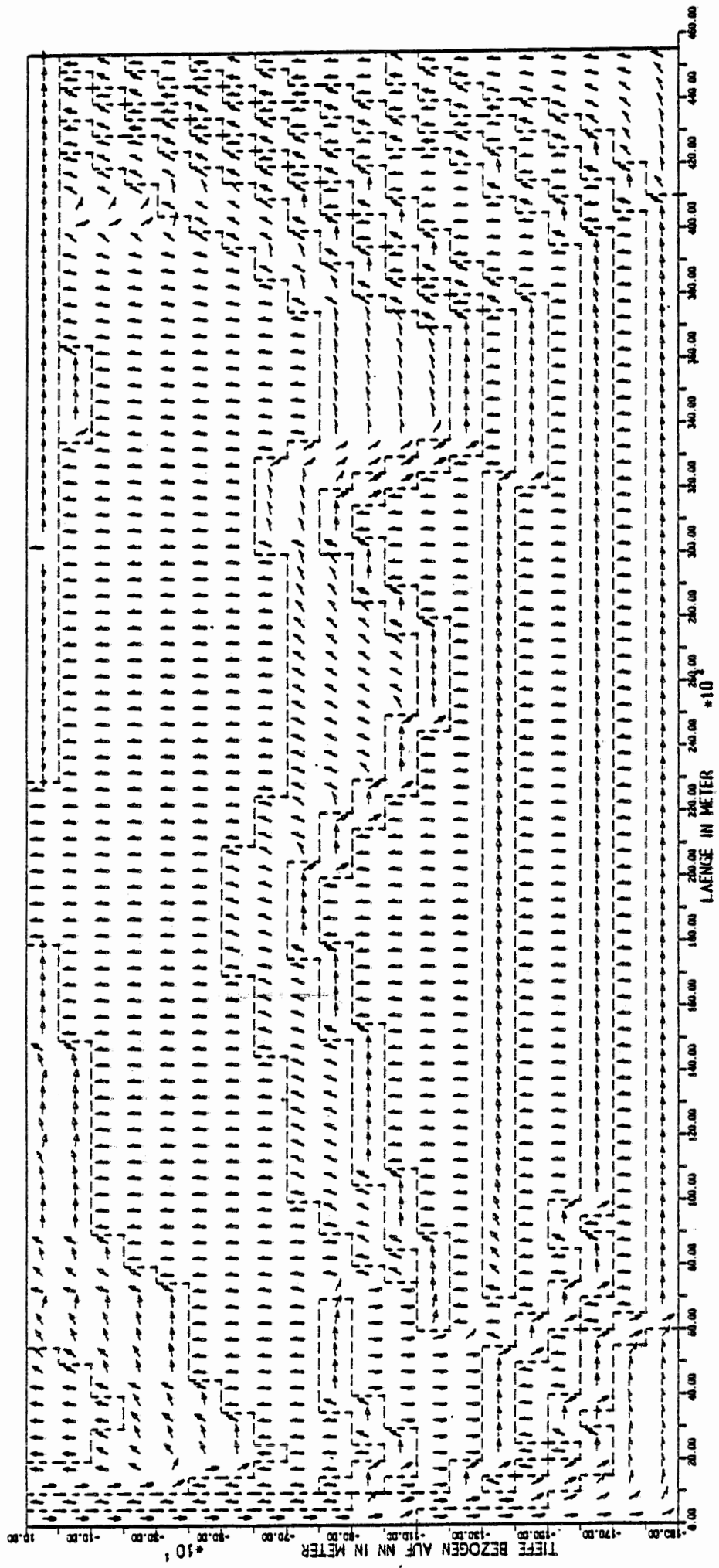
VERSION: 1.1

ABSTANDSGESCHWINDIGKEITEN

VERSION 1.2

1-E-01	W/A1	A	-	-
1-E-02	W/A1	A	-	-
1-E-03	W/A1	A	-	-
1-E-04	W/A1	A	-	-
1-E-05	W/A1	A	-	-
1-E-01	W/A1	A	-	-
1-E-02	W/A1	A	-	-
1-E-03	W/A1	A	-	-
1-E-04	W/A1	A	-	-
1-E-05	W/A1	A	-	-

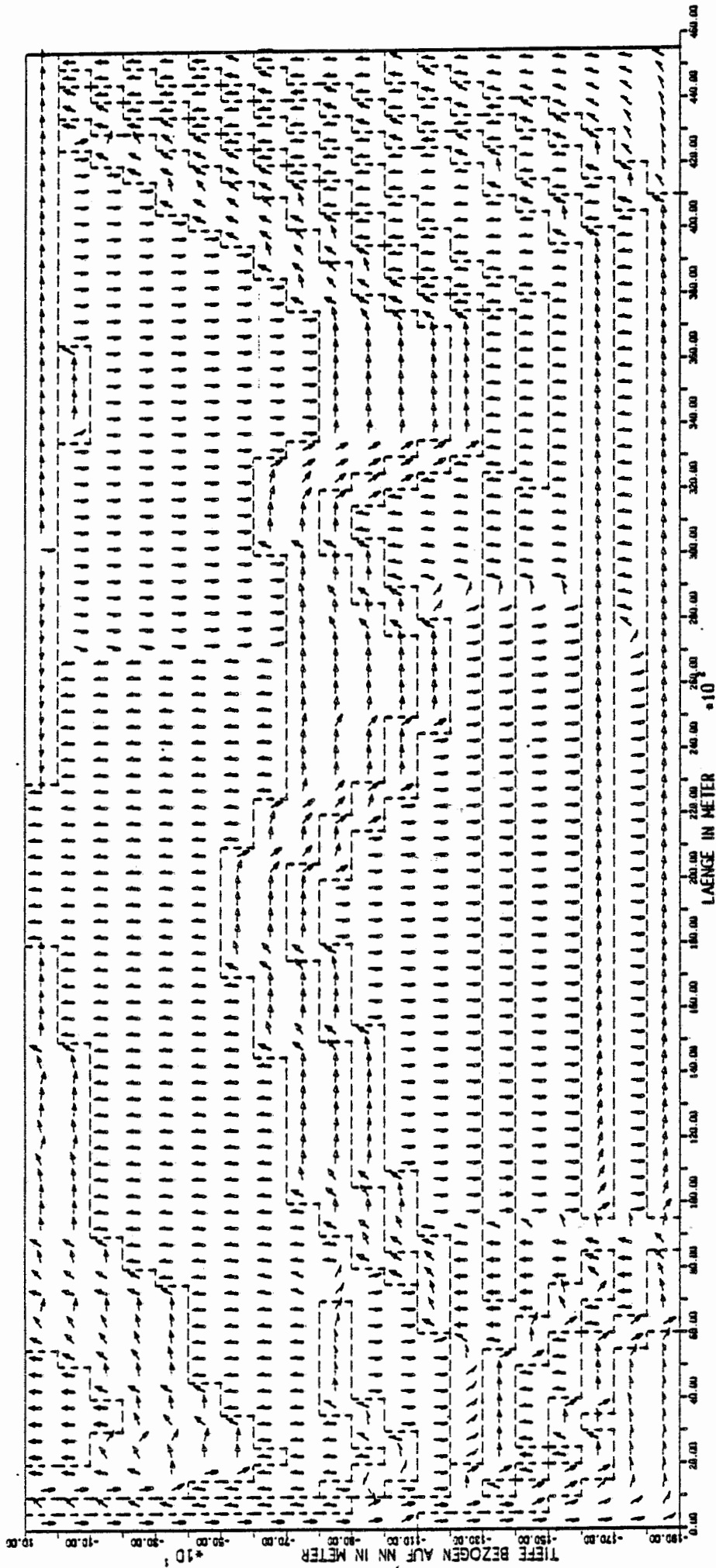




- ↑ 1+E -01 IM/AL
- ↑ 1+E -02 IM/AL
- ↑ 1+E -03 IM/AL
- ↑ 1+E -04 IM/AL
- ↑ 1+E -05 IM/AL
- ↑ V
- ↓ 1+E -01 IM/AL
- ↓ 1+E -02 IM/AL
- ↓ 1+E -03 IM/AL
- ↓ 1+E -04 IM/AL
- ↓ 1+E -05 IM/AL
- ↓ V

ABSTANDSGESCHWINDIGKEITEN

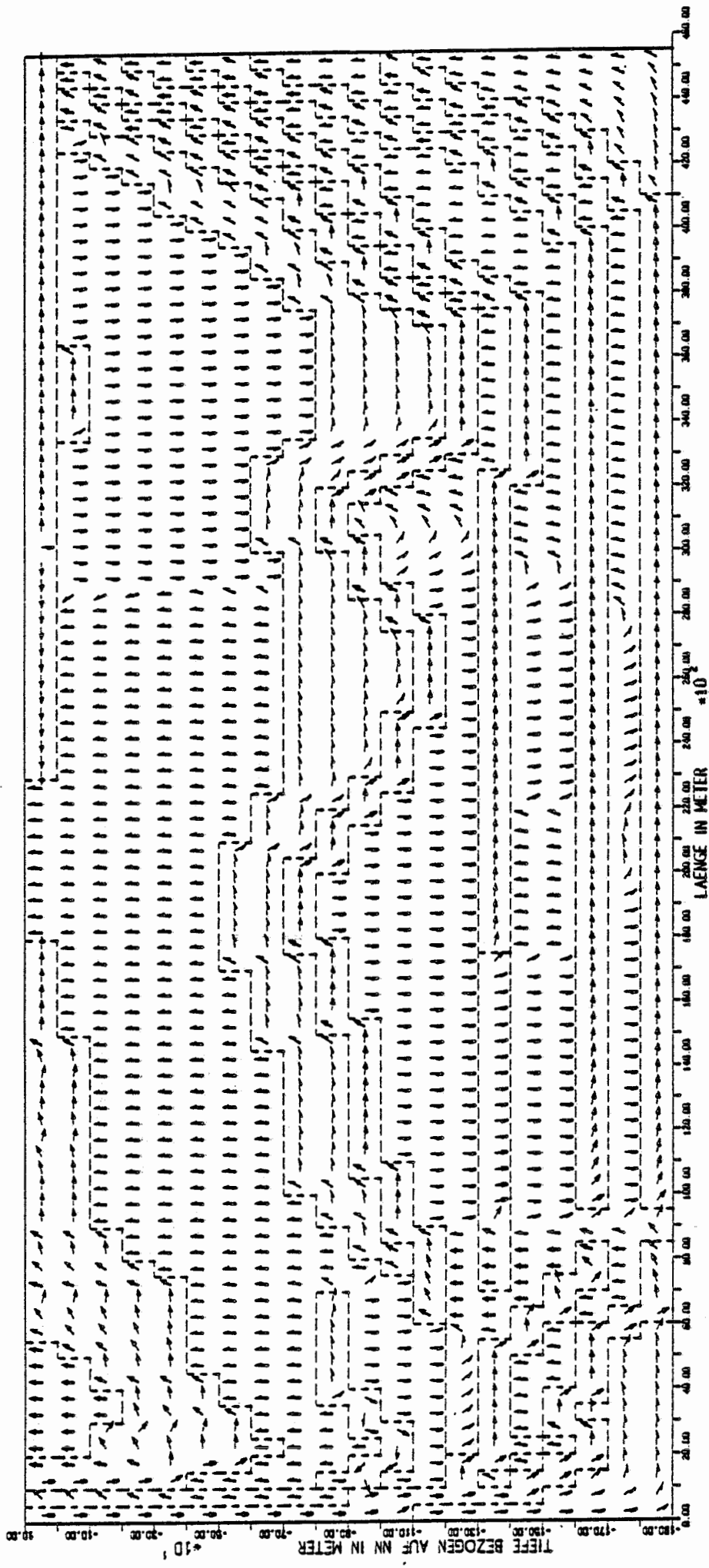
VERSION: 1.6



- ↑ 1+E -01 0M/AI V . 1+E -01 0M/AI
- ↑ 1+E -02 0M/AI V . 1+E -02 0M/AI
- ↑ 1+E -03 0M/AI V . 1+E -03 0M/AI
- ↑ 1+E -04 0M/AI V . 1+E -04 0M/AI
- ↑ 1+E -05 0M/AI V . 1+E -05 0M/AI

ABSTANDSGESCHWINDIGKEITEN

VERSION: 4.2

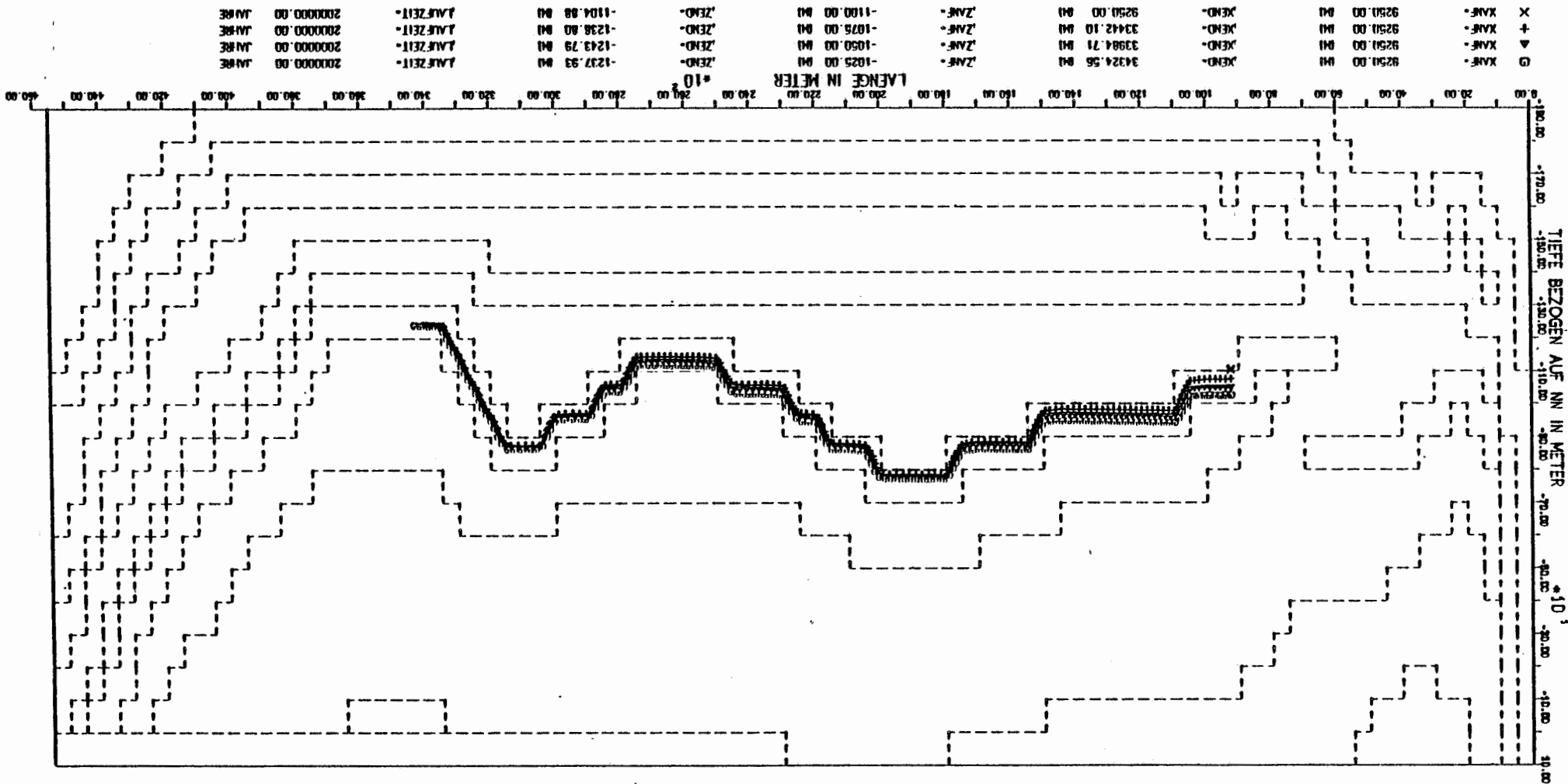


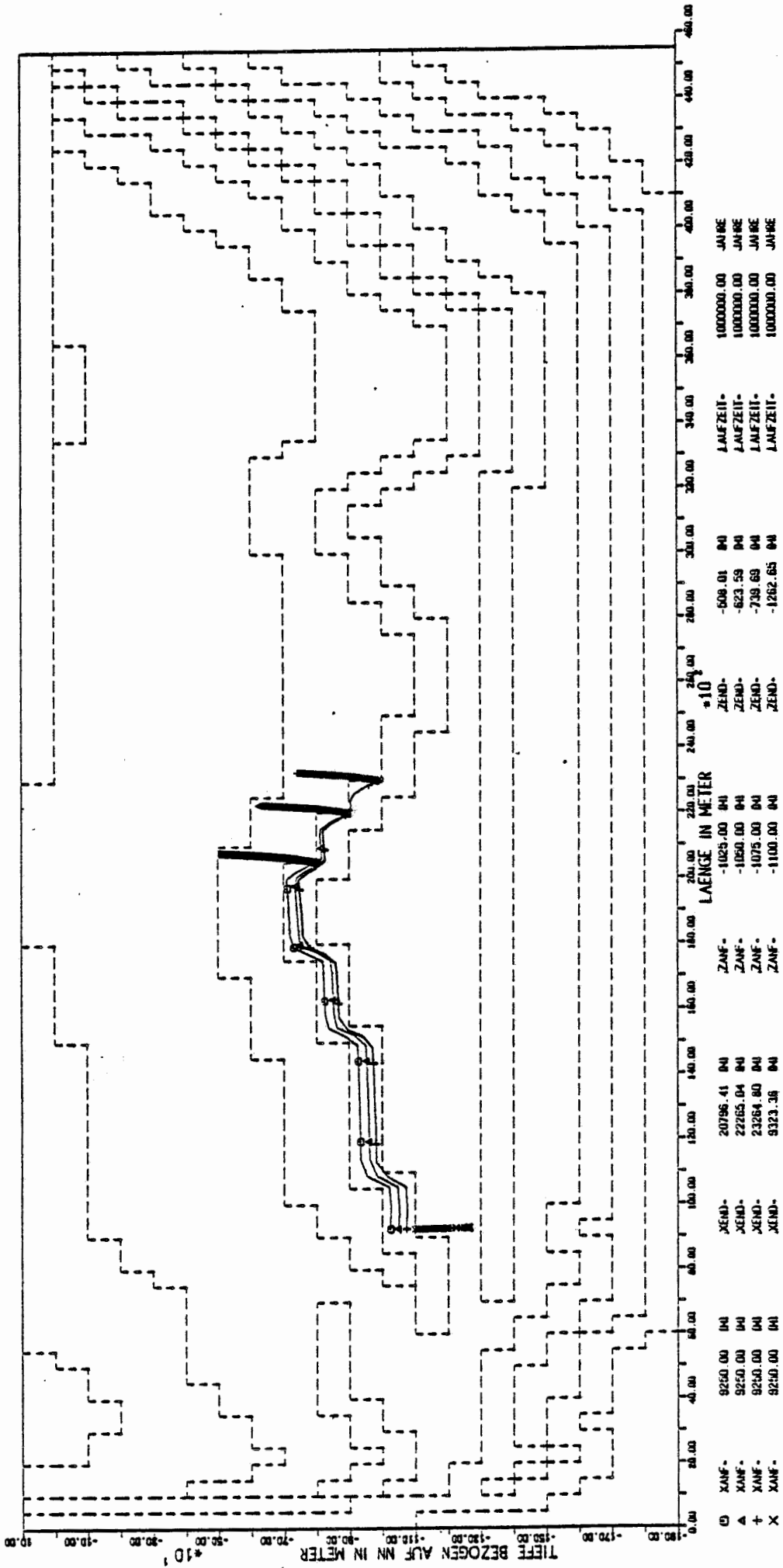
- ↑ 1+E -01 IM/A1 - V - 1+E -01 IM/A1
- ↑ 1+E -02 IM/A1 - V - 1+E -01 IM/A1
- ↑ 1+E -03 IM/A1 - V - 1+E -02 IM/A1
- ↑ 1+E -04 IM/A1 - V - 1+E -03 IM/A1
- ↑ 1+E -05 IM/A1 - V - 1+E -04 IM/A1
- ↑ 1+E -06 IM/A1 - V - 1+E -06 IM/A1

ABSTANDSGESCHWINDIGKEITEN
 VERSION: 9.1

Anlage 5: Fließwege und Laufzeiten

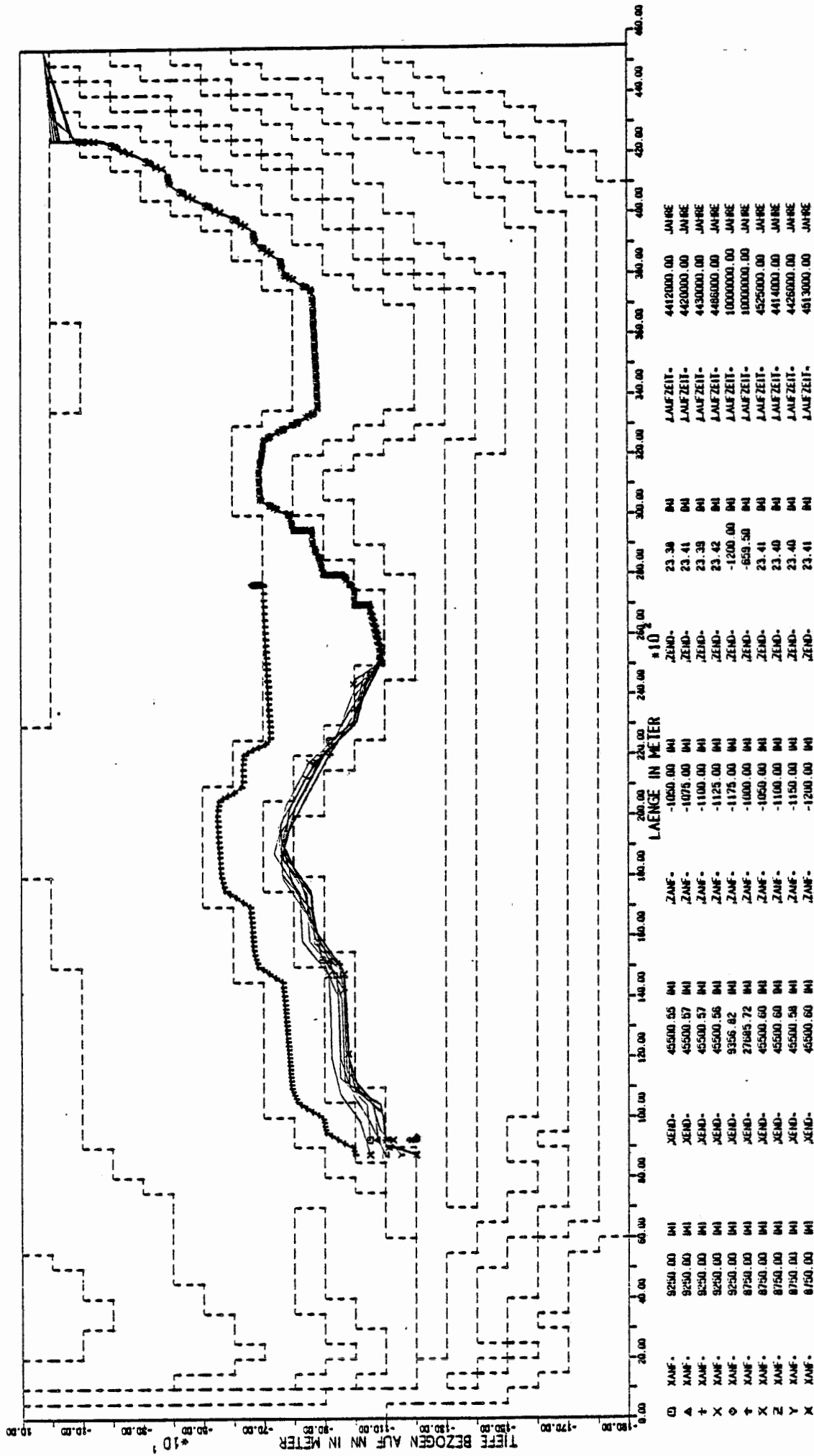
FLIESSWEGE UND LAUFZEITEN FÜR WASSERTEILCHEN





FLIESSWEGE UND LAUFZEITEN FUER WASSERTEILCHEN

VERSION: 1.4

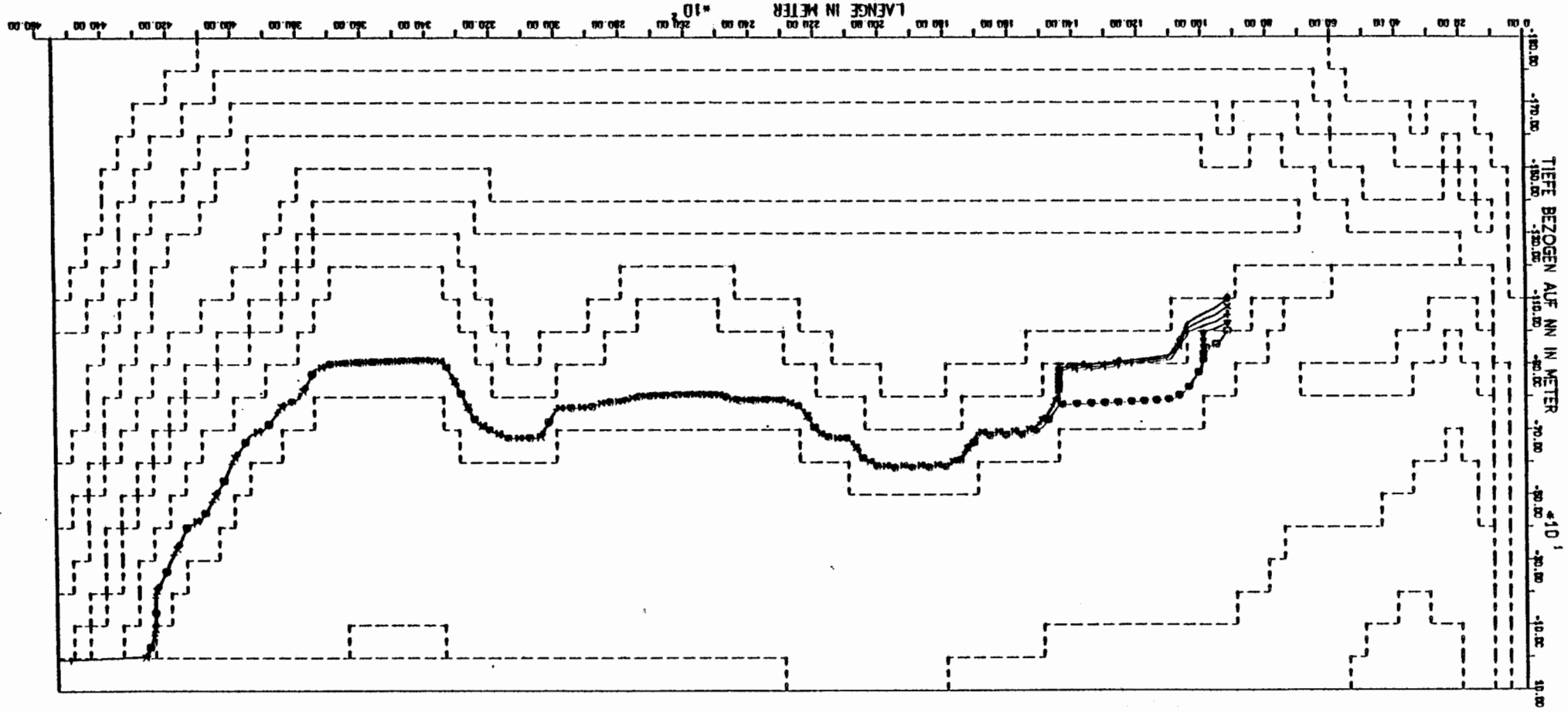


FLIESSWEGE UND LAUFZEITEN FUER WASSERTEILCHEN

VERSION: 3.1

FLIESSWEGE UND LAUFZEITEN FÜR WASSERTEILCHEN

Symbol	XARF	XEND	ZARF	ZEND	LAUFZEIT	JARF
◇	9250.00	9250.00	45500.75	94	6.22	932900.00
×	9250.00	9250.00	45531.47	94	6.11	852300.00
+	9250.00	9250.00	45531.61	94	6.11	862900.00
△	9250.00	9250.00	45531.42	94	6.22	945100.00
□	9250.00	9250.00	45500.75	94	6.22	932900.00

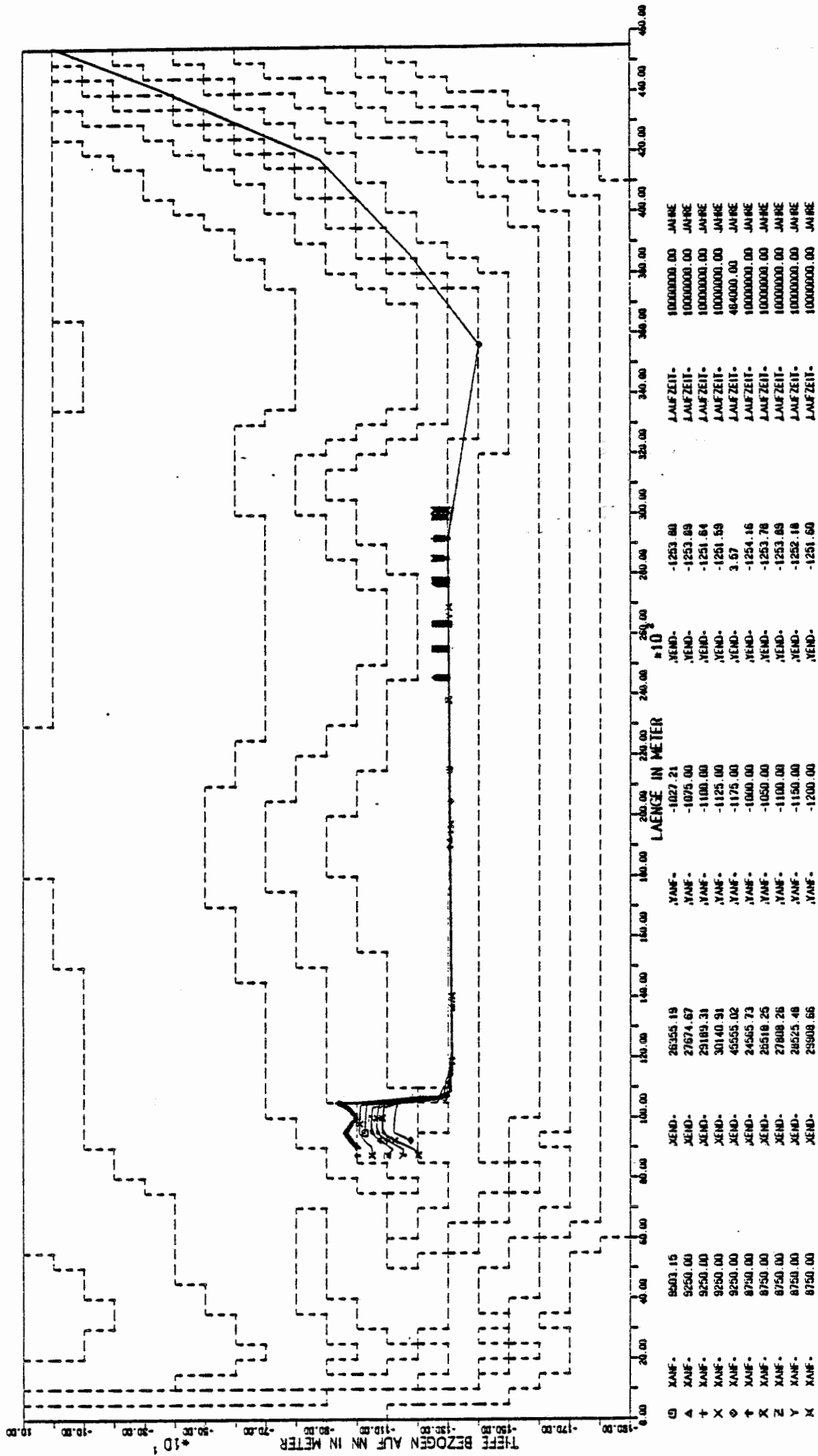


LÄNGE IN METERN

TIEFE BEZOGEN AUF NN IN METERN

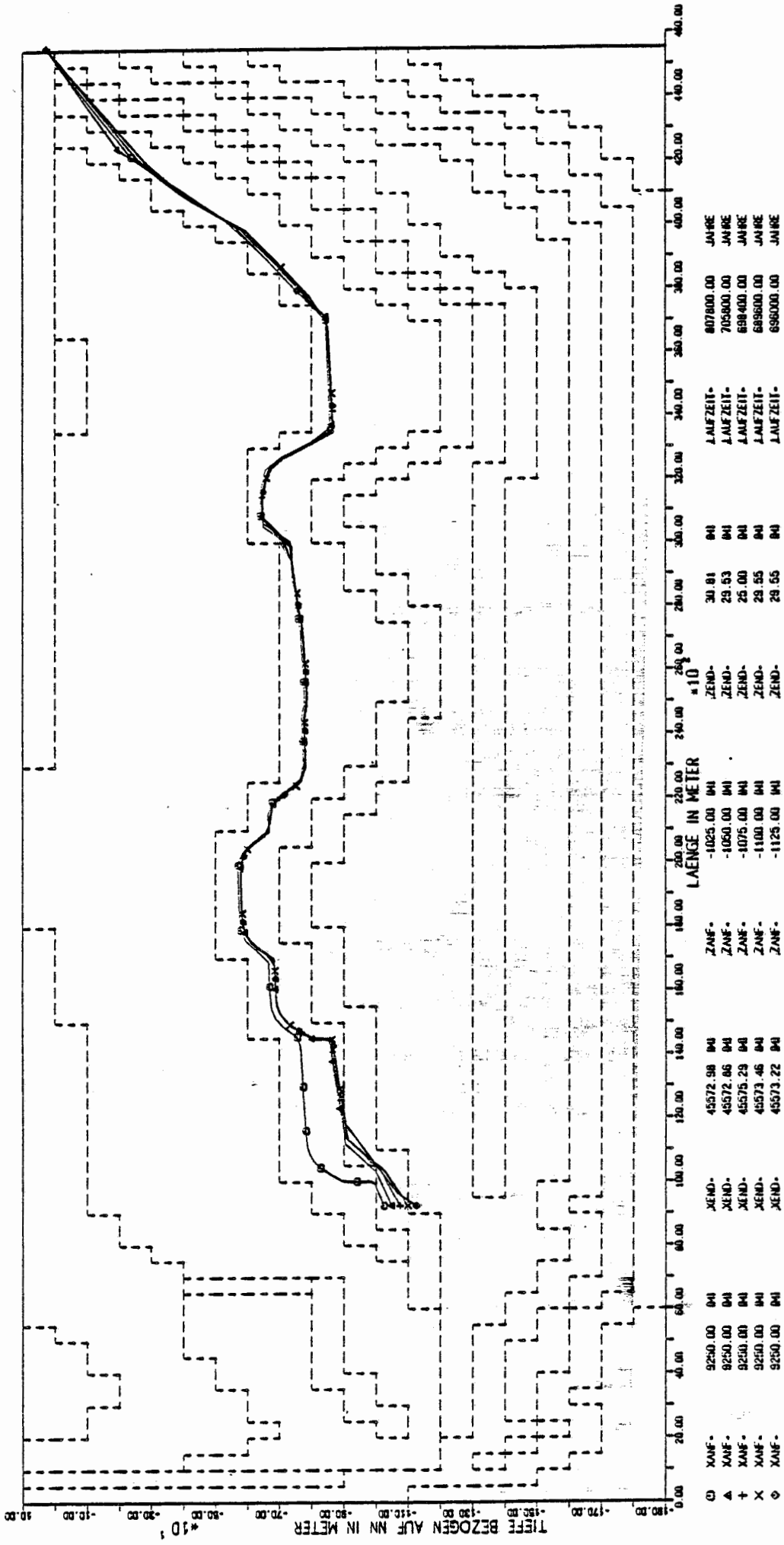
*10

*10



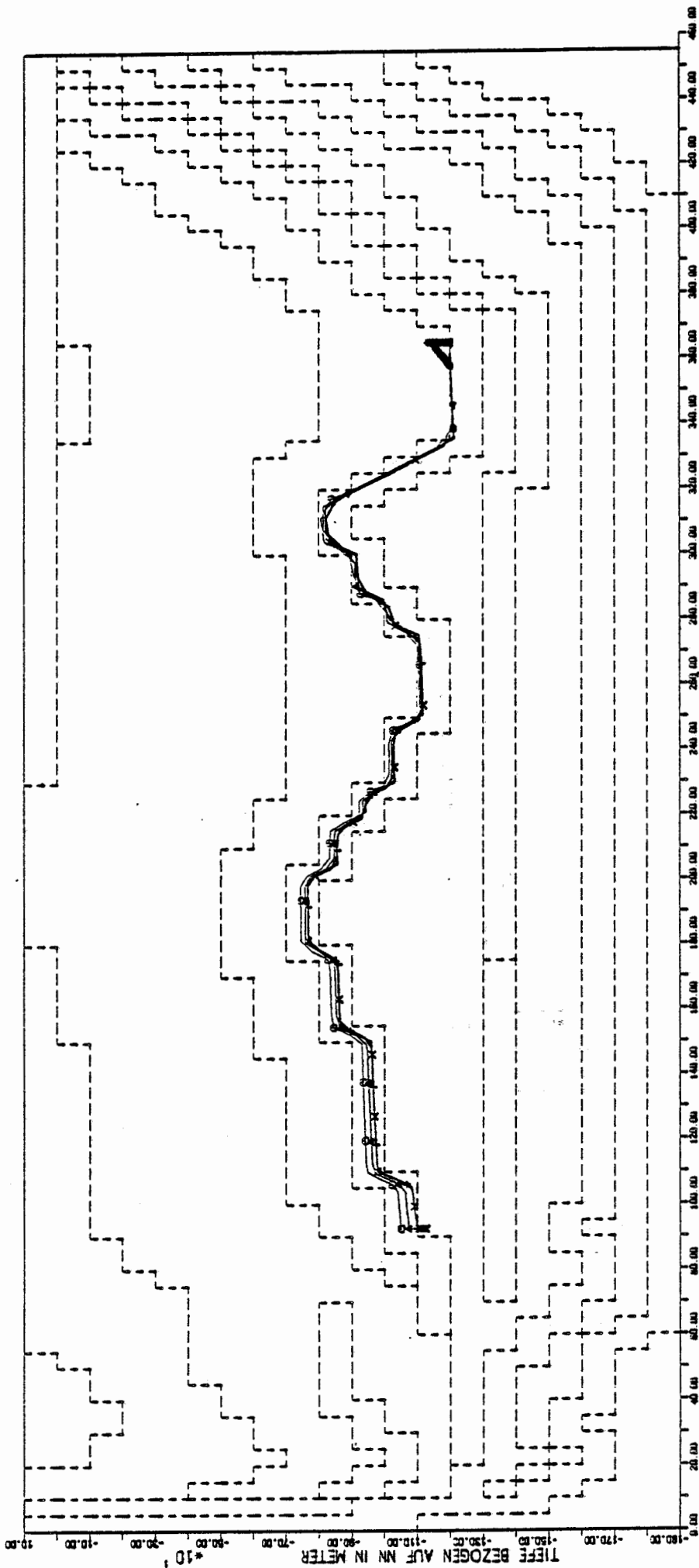
FLIESSWEGE UND LAUFZEITEN FUER WASSERTEILCHEN

VERSION 5.1



FLIESSWEGE UND LAUFZEITEN FUER WASSERTEILCHEN

VERSION: 7.1



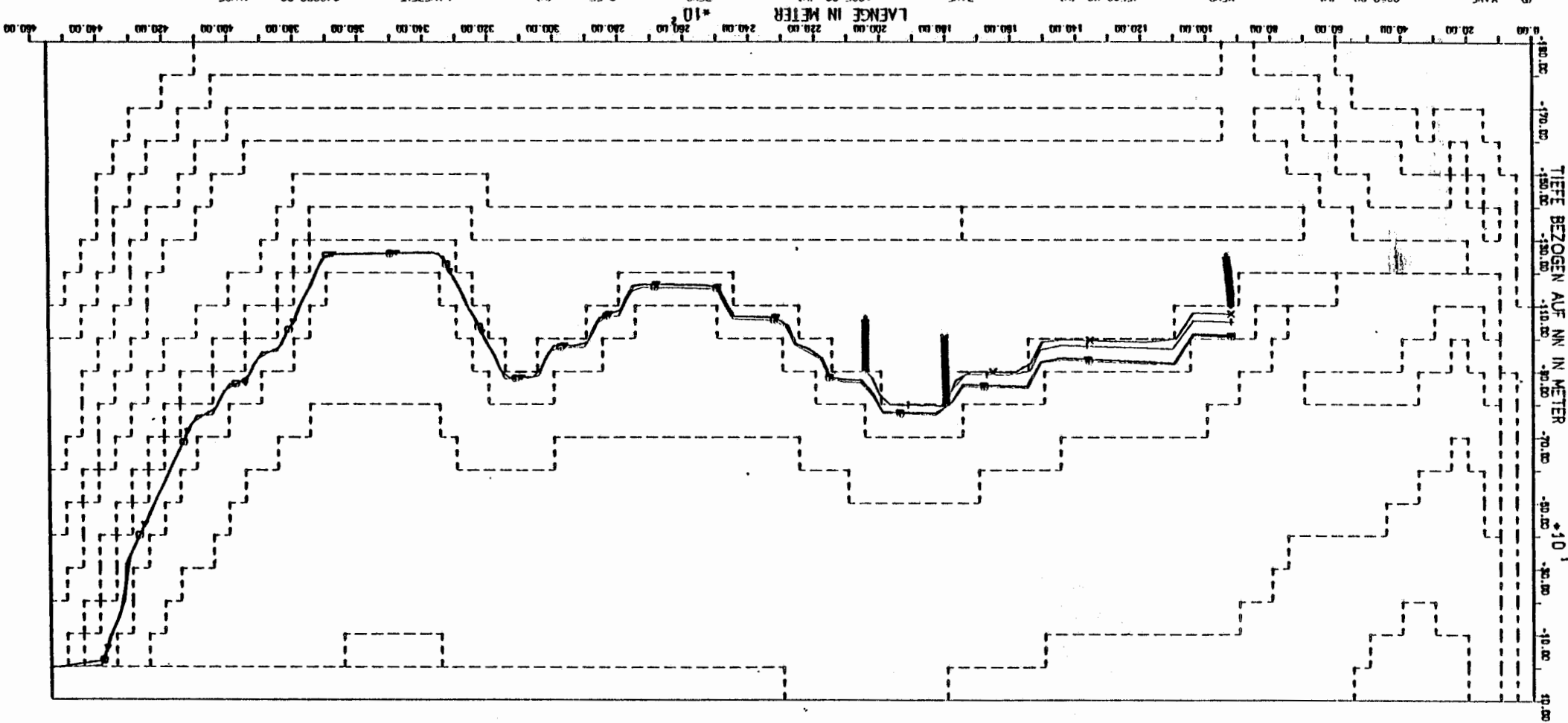
Symbol	Start Point	End Point	Length (m)	Date
□	XANF-	9250.00 IM		
△	XANF-	9250.00 IM		
+	XANF-	9250.00 IM		
X	XANF-	9250.00 IM		
	ZANF-	36492.30 IM		
	ZANF-	36494.78 IM		
	ZANF-	36497.89 IM		
	ZANF-	36499.99 IM		
	ZANF-	-1050.00 IM		
	ZANF-	-1075.00 IM		
	ZANF-	-1100.00 IM		
	ZANF-	-1125.00 IM		
	ZANF-	-1134.16 IM		
	ZANF-	-1130.70 IM		
	ZANF-	-1130.63 IM		
	ZANF-	-1133.87 IM		
	ZANF-	1000000.00		
	ZANF-	1000000.00		
	ZANF-	1000000.00		
	ZANF-	1000000.00		

FLIESSWEGE UND LAUFZEITEN FUER WASSERTEILCHEN

VERSION: B.1

FLIESSWEGE UND LAUFZEITEN FÜR WASSERTEILCHEN

Symbol	X [m]	Y [m]	Z [m]	Flow Time [s]	Flow Time [min]
+	9250.00	0.00	9402.17	-1247.78	100000.00
◇	9250.00	0.00	9390.86	-1224.25	100000.00
x	9250.00	0.00	18057.14	-1001.72	100000.00
+	9250.00	0.00	20473.98	-1050.44	100000.00
△	9250.00	0.00	4530.56	3.41	241500.00
○	9250.00	0.00	4528.88	3.55	240000.00



Anlage 6: Isolinien für die hydraulischen Höhen

a) Printplots

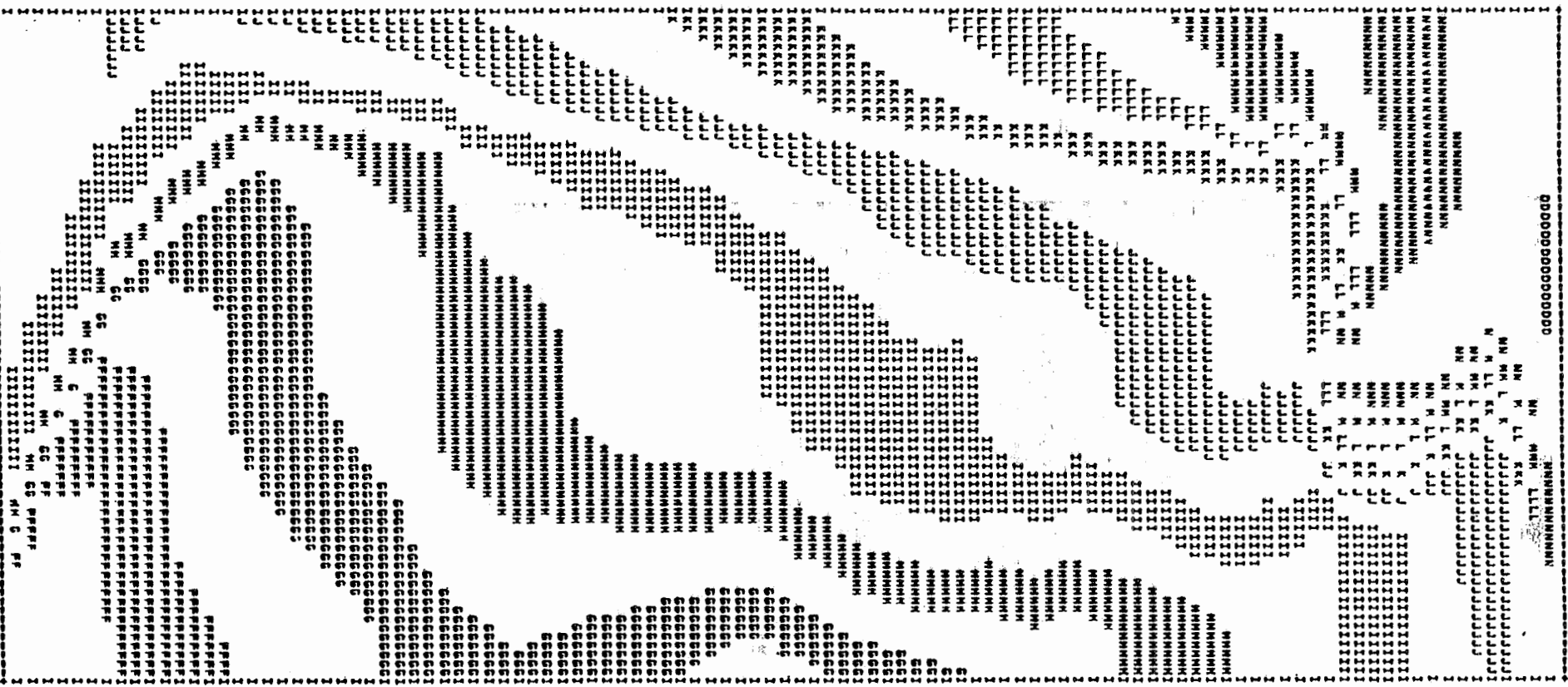
b) Kopien von Farbplots

ISOLIEN FUER DIE HYDAULISCHEN HOEHEN

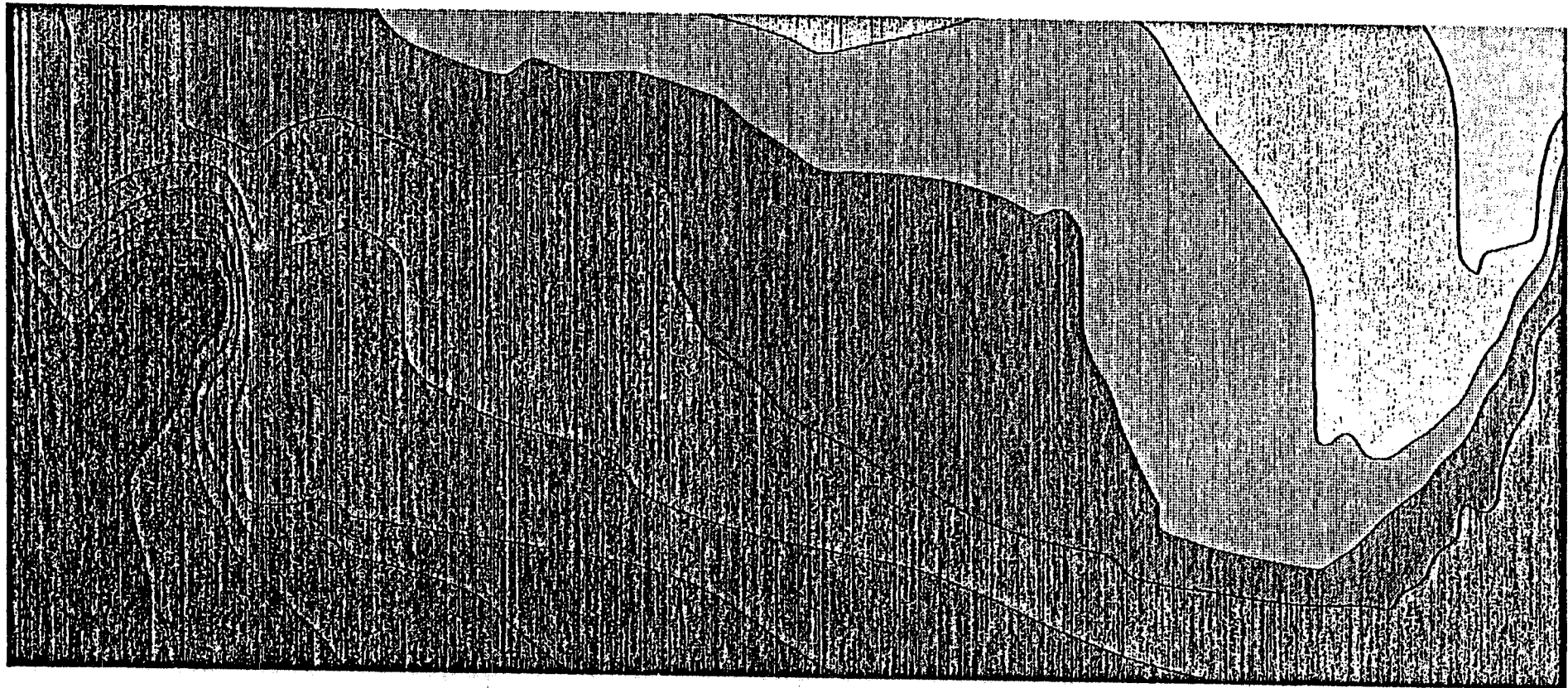
VERSIONSNUMMER : 1-1

PLAT BESRENT DURCH KANF= 250.00 UND KEND= 45250.00
SOWIE DURCH ZANF= 1850.00 UND ZEND= 150.00

ANSTAND DER ISOLIEN : 5.00



ISOLINIEN FUER DIE HYDRAULISCHE HOEHE: MODELLSCHNITT KONRAD
VERSION: 1.1
UEBERHOEHUNG: 10:1



■	ABOVE	140
■		130 - 140
■		120 - 130
■		110 - 120
■		100 - 110
■		90 - 100
■		80 - 90
■		70 - 80
■		60 - 70
■		0 - 60
■	BELOW	0

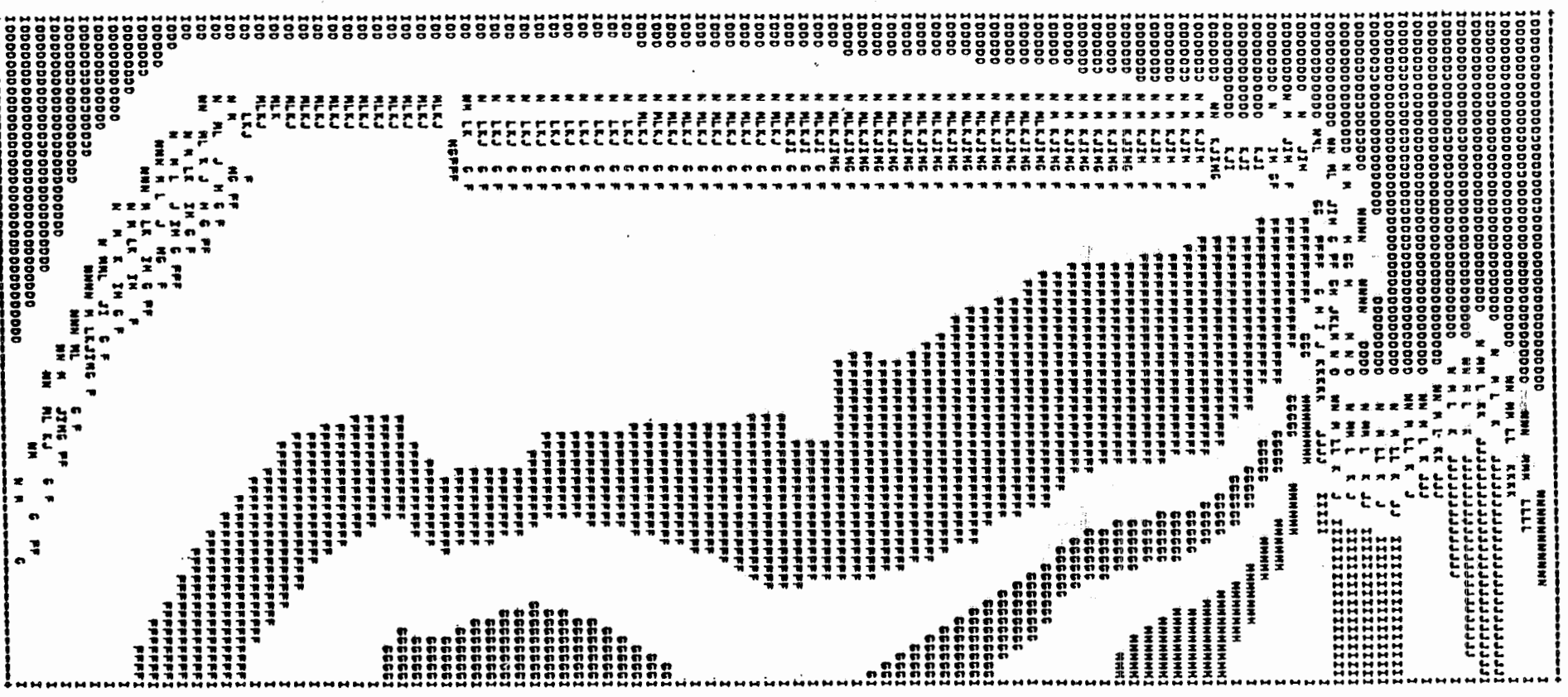
HYDRAULISCHE HOEHE
IN METER UEBER NN

ISOLIEN FÜR DIE HYDRAULISCHEN HOHEN

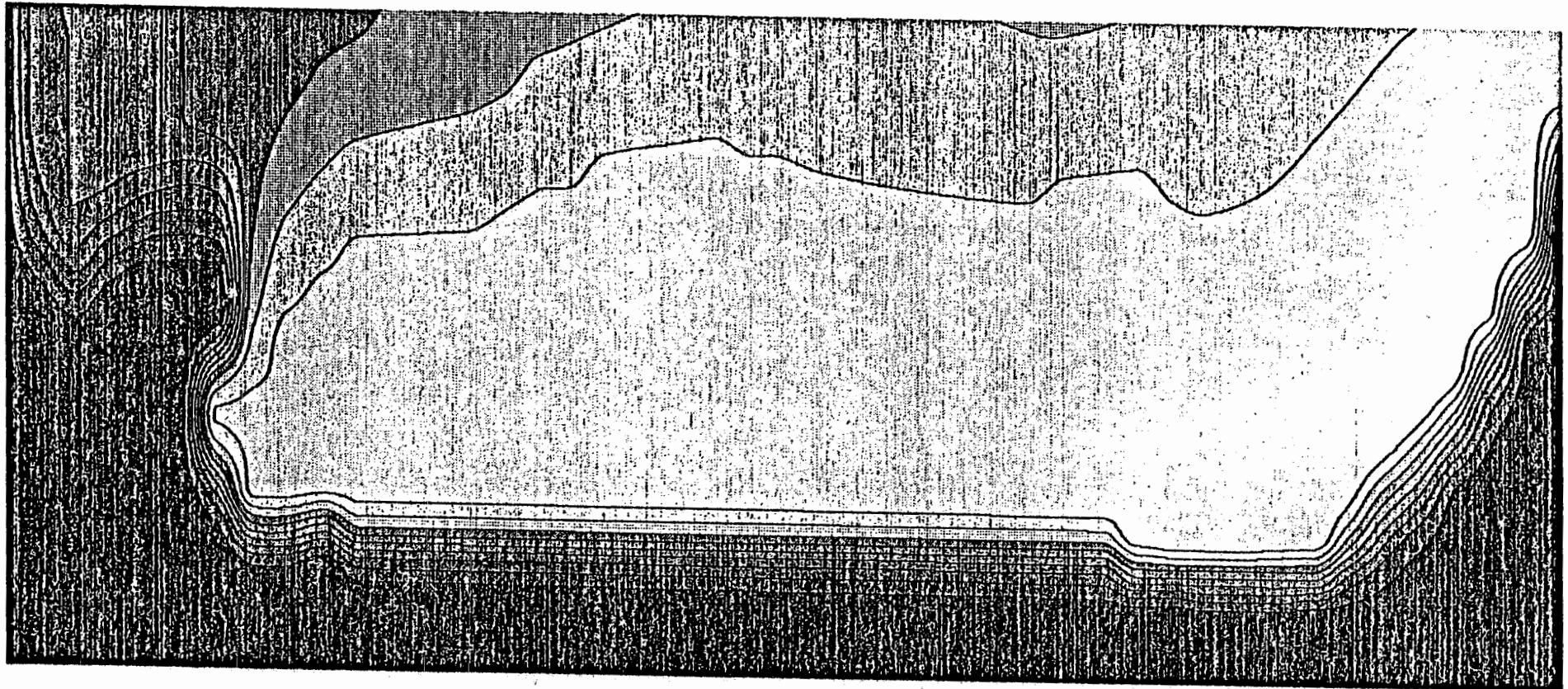
VERSIONSNUMMER 3 1.2

PLAT BEGRENZT DURCH ZAHF= 250.00 UND ZEND= 65250.00
SOWIE DURCH ZAHF= -1850.00 UND ZEND= 150.00

ABSTAND DER ISOLIEN 1 3.00



ISOLINIEN FUER DIE HYDRAULISCHE HOEHE: MODELLSCHNITT KONRAD
VERSION: 1.2
UEBERHOEHUNG: 10:1



	ABOVE	140
		130 - 140
		120 - 130
		110 - 120
		100 - 110
		90 - 100
		80 - 90
		70 - 80
		60 - 70
		0 - 60
	BELOW	0

HYDRAULISCHE HOEHE

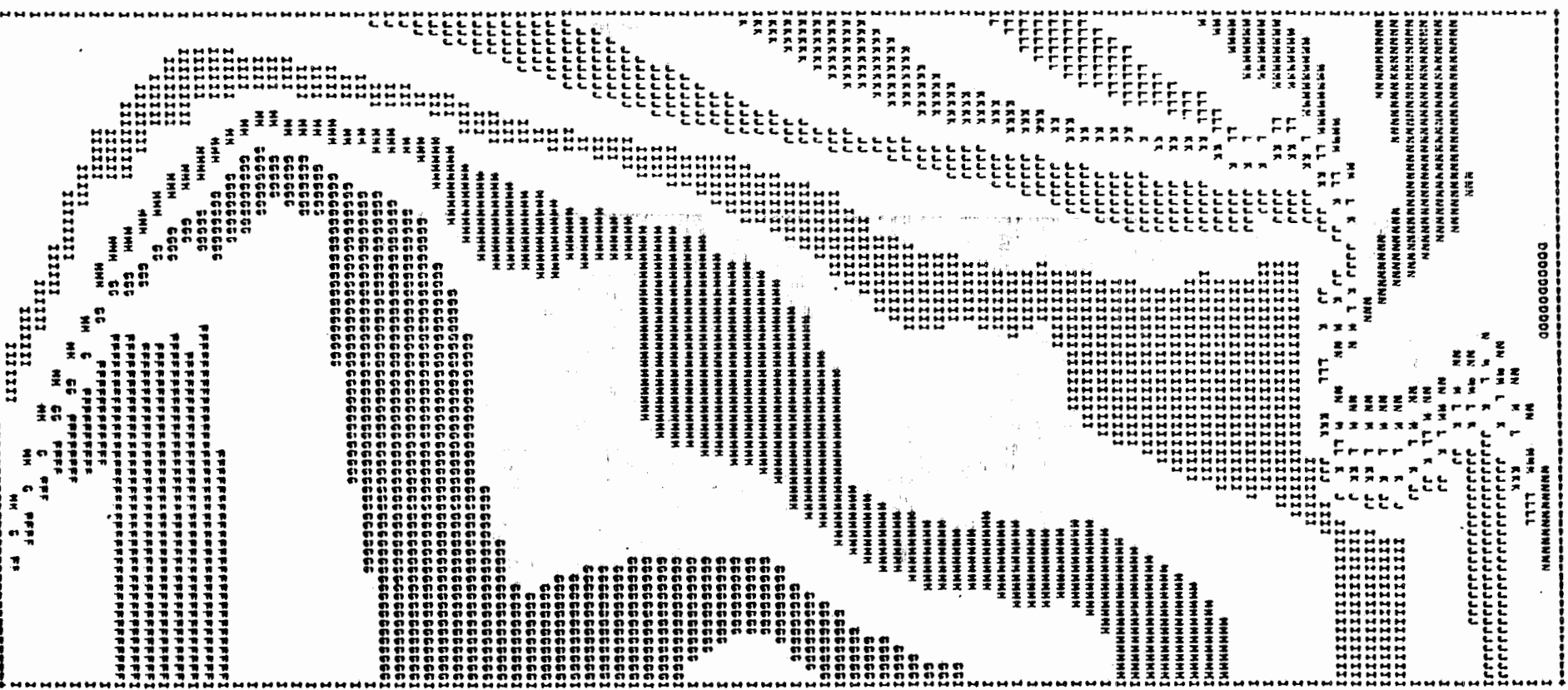
IN METER UEBER NN

ISOLINIEN FÜR DIE HYDRAULISCHEN HOHEN

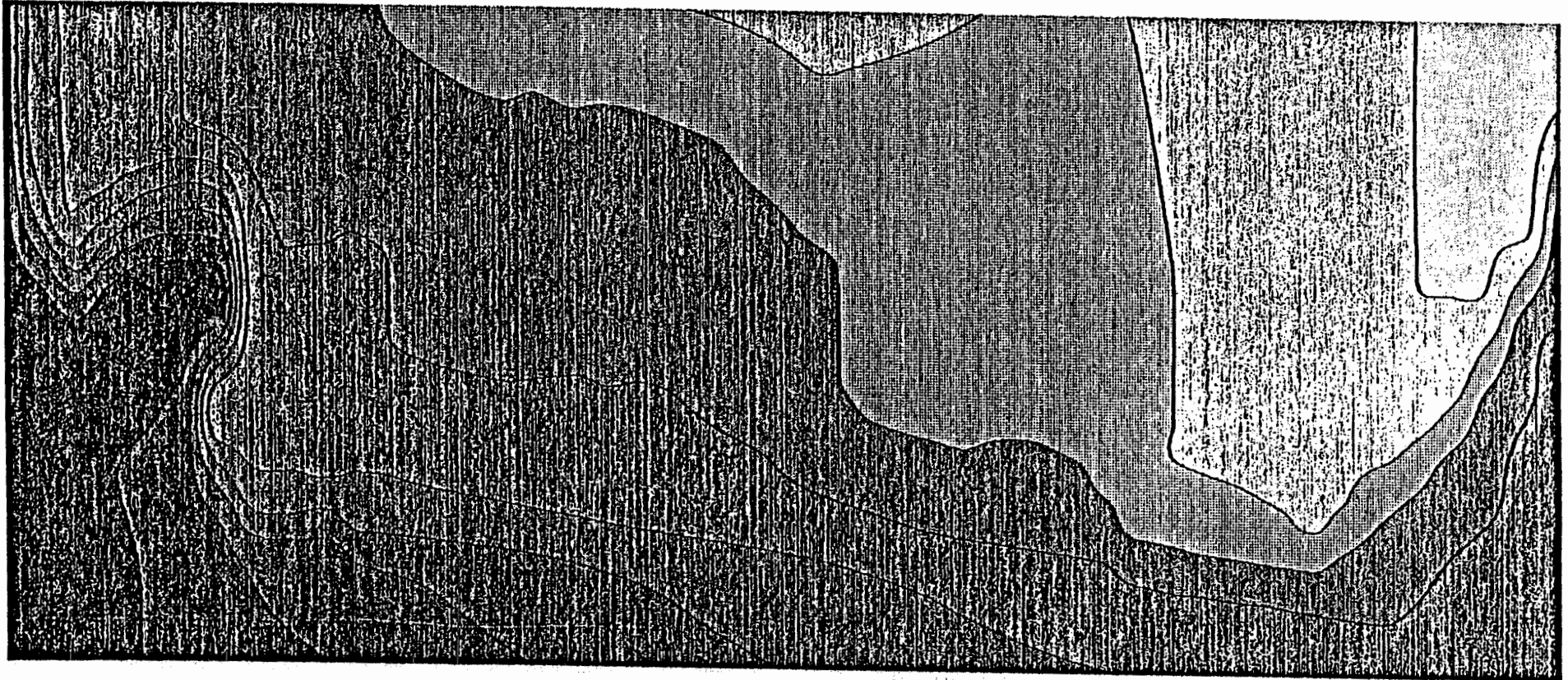
VERMESSUNGSWERTER : 1,6

PLAT BEGREIT DURCH KANF - 250.00 UND KEND - 45250.00
SOWIE DURCH ZANF - 1050.00 UND ZEND - 190.00

ABSTAND DER ISOLINIEN : 5.00



ISOLINIEN FUER DIE HYDRAULISCHE HOEHE: MODELLSCHNITT KONRAD
VERSION: 1.6
UEBERHOEHUNG: 10:1



■	ABOVE	140
■		130 - 140
■		120 - 130
■		110 - 120
■		100 - 110
■		90 - 100
■		80 - 90
■		70 - 80
■		60 - 70
■		0 - 60
■	BELOW	0

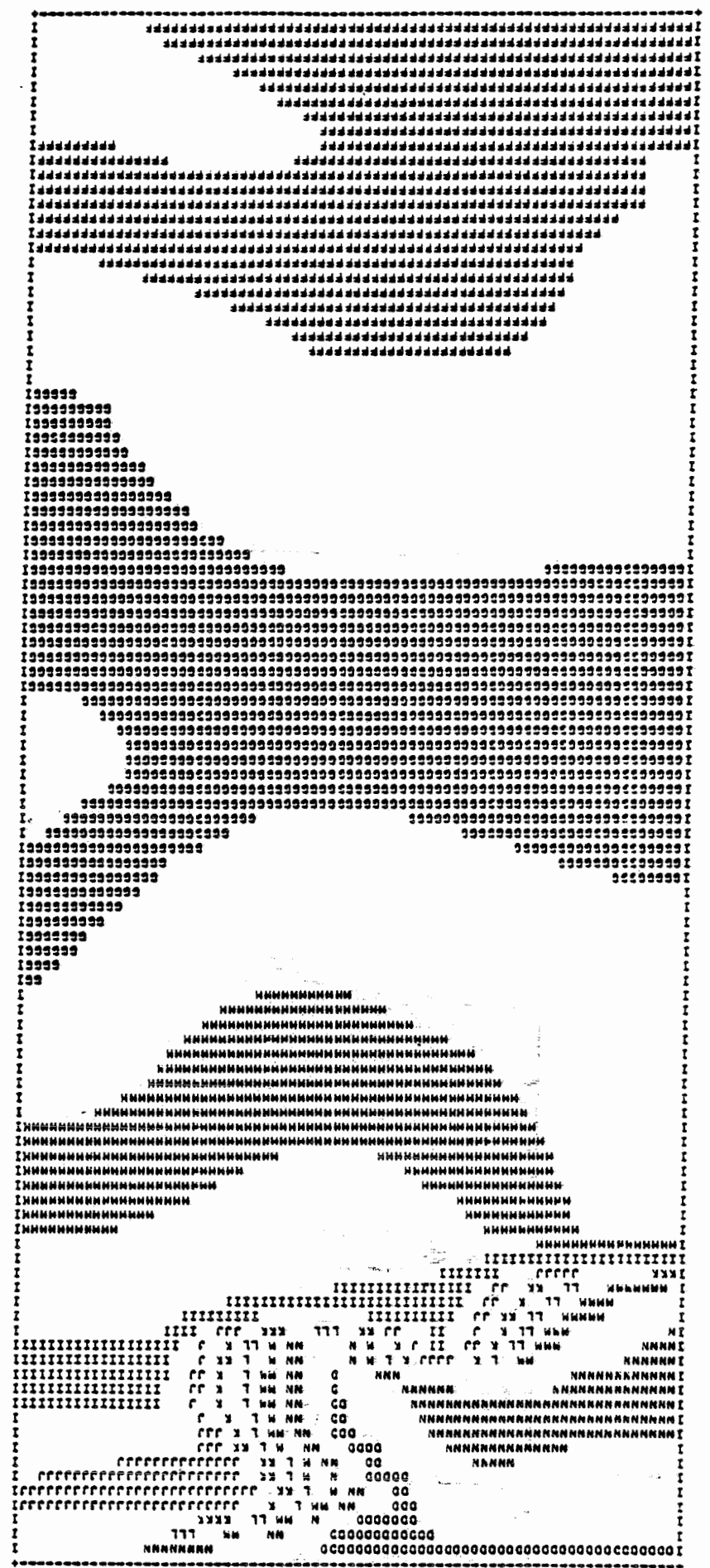
HYDRAULISCHE HOEHE
IN METER UEBER NN

ISOLINIEN FUER DIE HYDRAULISCHEN HOEHEN

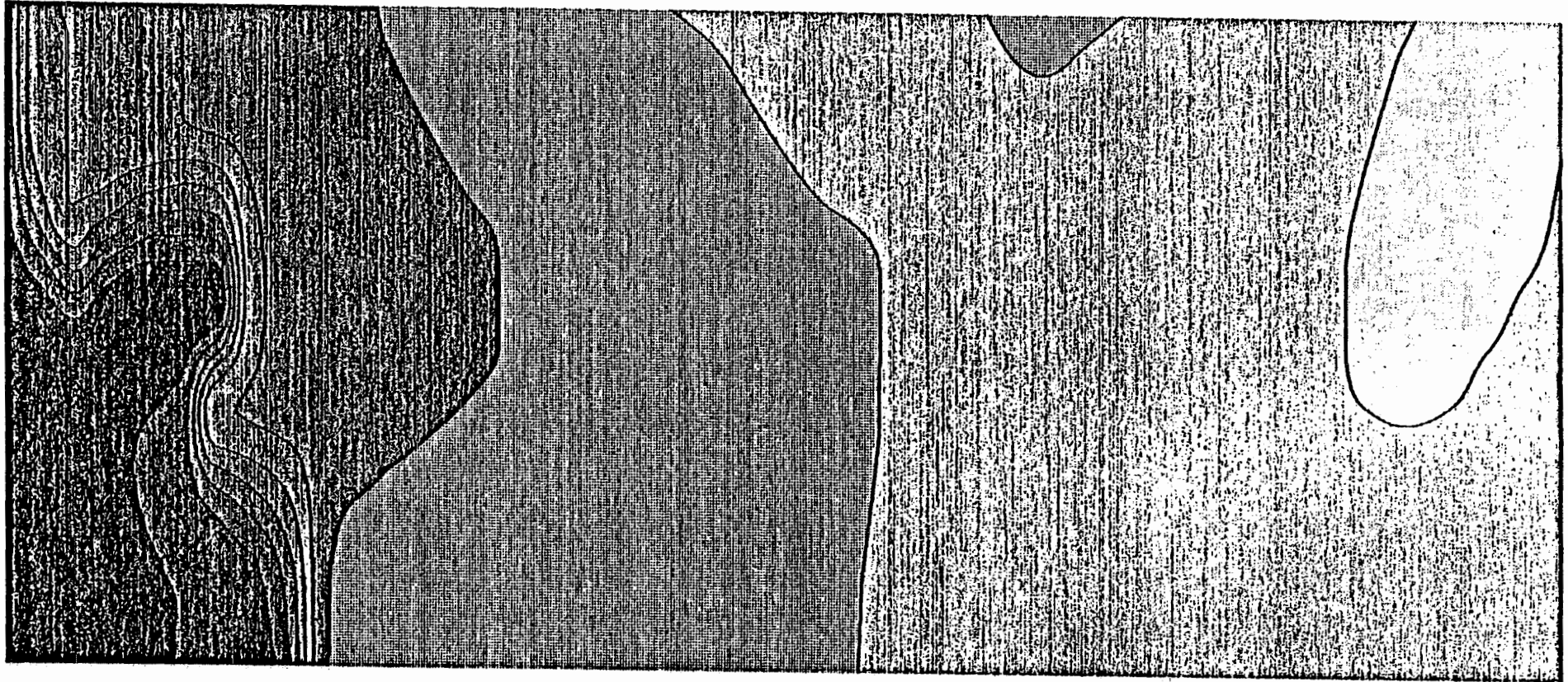
VERSIONUMMER : 4.2

PLOT BEGRENZT DURCH XANF= 250.00 UND XEND= 4520.00
SOWIE DURCH YANF= -1050.00 UND YEND= 190.00

ABSTAND DER ISOLINIEN : 5.00



ISOLINIEN FUER DIE HYDRAULISCHE HOEHE: MODELLSCHNITT KONRAD
VERSION: 4.2
UEBERHOEHUNG: 10:1



Dark gray	ABOVE	140
Dark gray	130 - 140	
Dark gray	120 - 130	
Dark gray	110 - 120	
Dark gray	100 - 110	
Dark gray	90 - 100	
Dark gray	80 - 90	
Dark gray	70 - 80	
Dark gray	60 - 70	
Dark gray	0 - 60	
White	BELOW	0

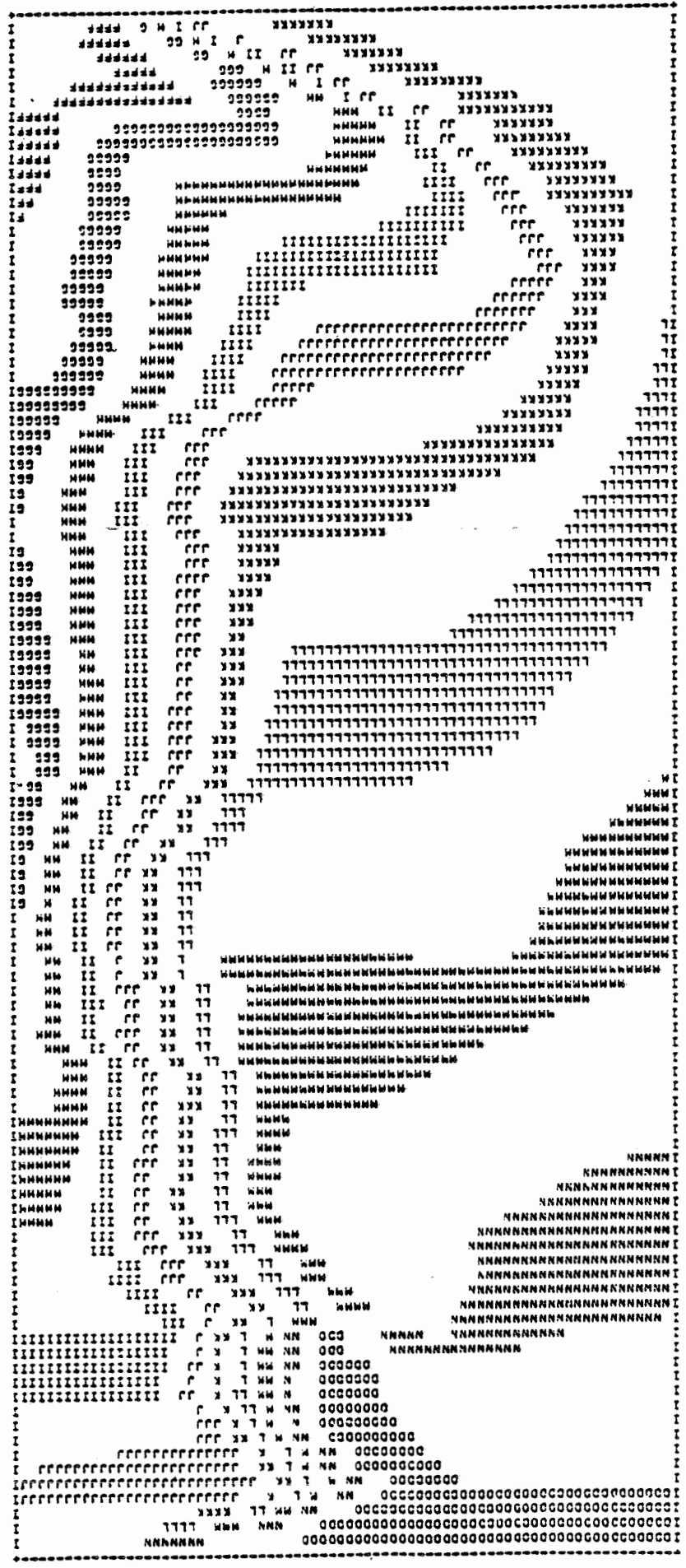
HYDRAULISCHE HOEHE
IN METER UEBER NN

ISOLIEN FÜR DIE HYDRAULISCHEN HOEHEN

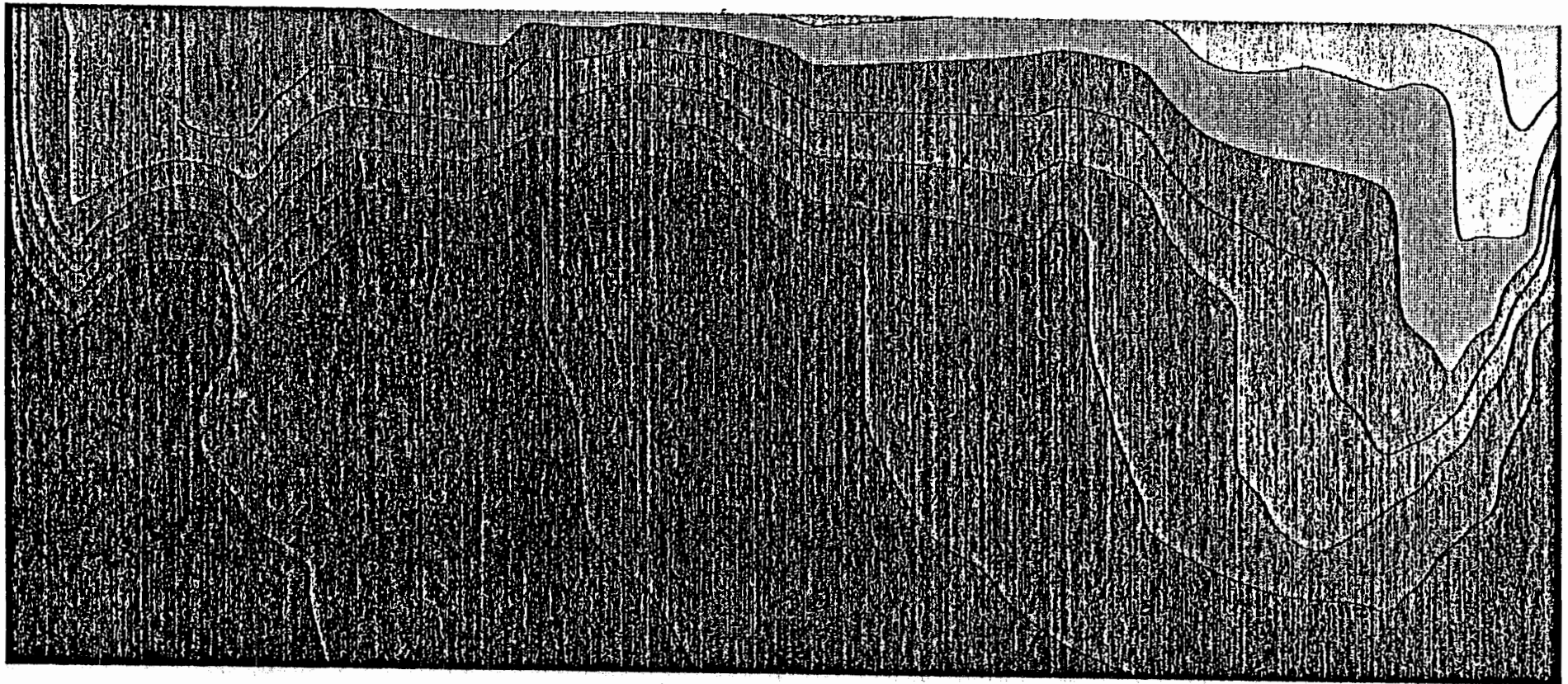
VERSIONSUMMER : 8.1

PLOT BEGRENZE DURCH KAMP= 250.00 UND KEND= 65250.00
SOWIE DURCH LAMP= -1850.00 UND LEND= 150.00

AUSTAUSCH DER ISOLIEN : 5.00



ISOLINIEN FUER DIE HYDRAULISCHE HOEHE: MODELLSCHNITT KONRAD
VERSION: 8.1
UEBERHOEHUNG: 10:1



■	ABOVE	140
■		130 - 140
■		120 - 130
■		110 - 120
■		100 - 110
■		90 - 100
■		80 - 90
■		70 - 80
■		60 - 70
■		0 - 60
■	BELOW	0

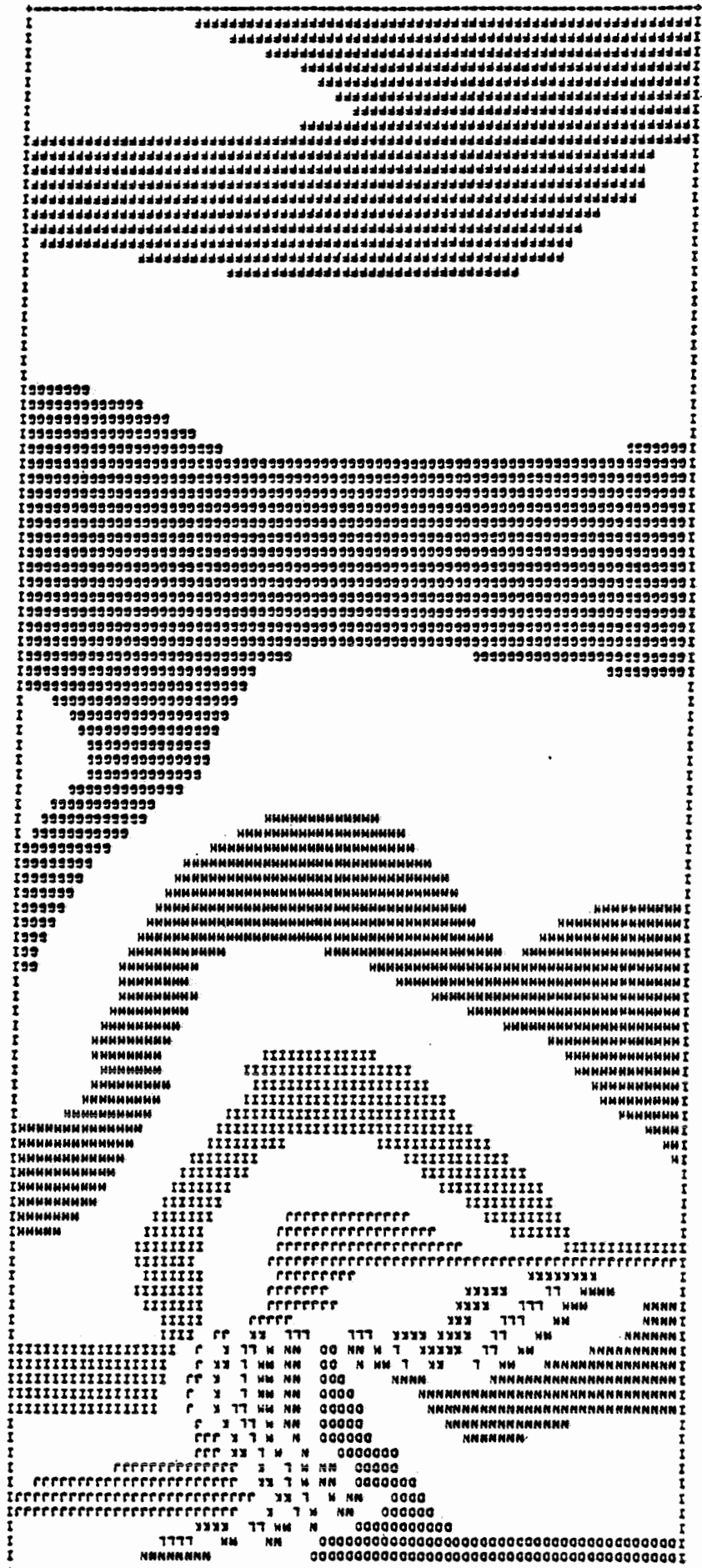
HYDRAULISCHE HOEHE
IN METER UEBER NN

ISOLIEN FUEH DIE HYDRAULISCHEN HOEHEN

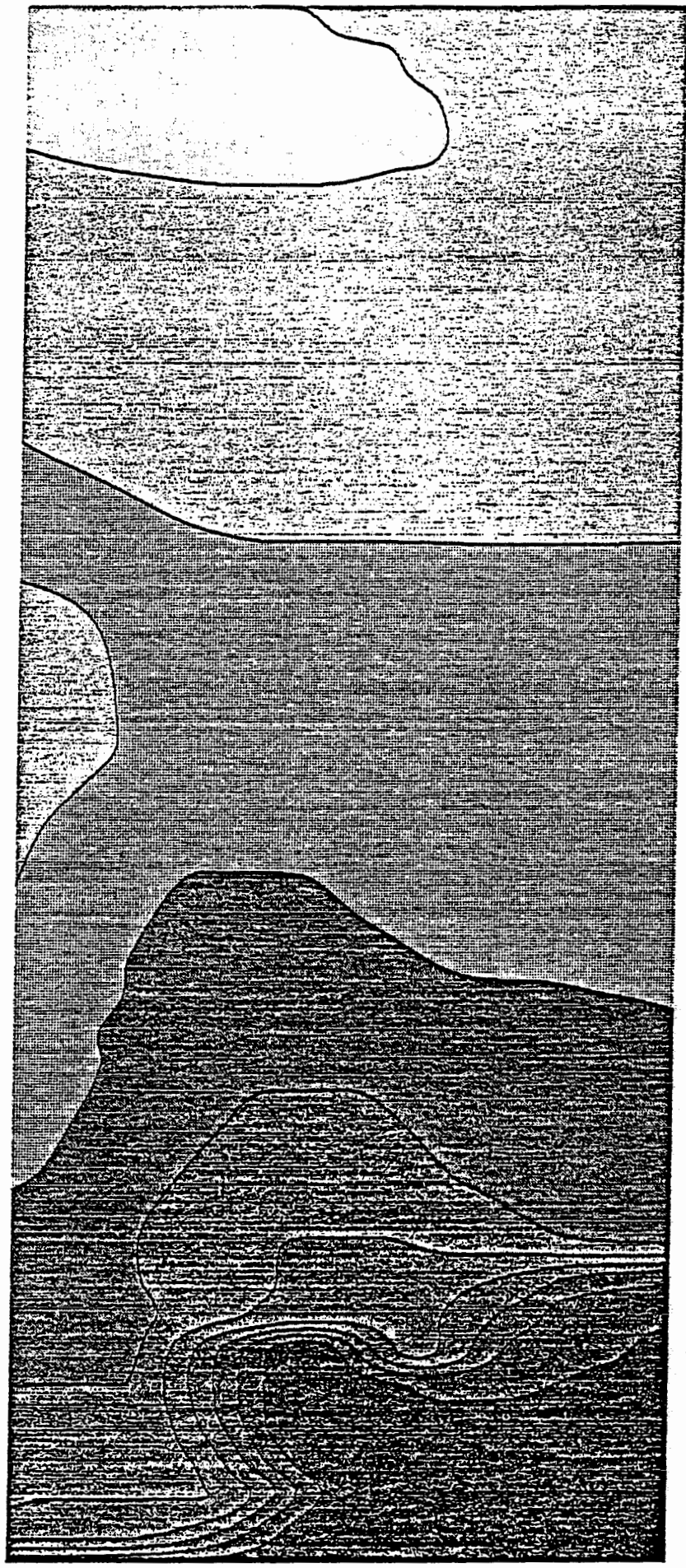
VERSIONSUMMER : 9.1

PLOT BEGRENZT DURCH KANF= 250.00 UND KEND= 45250.00
SONSTIG DURCH KANF= -1050.00 UND KEND= 150.00

ABSTAND DER ISOLIEN : 5.00



ISOLINIEN FUER DIE HYDRAULISCHE HOEHE: MODELLSCHNITT KONRAD
 VERSION: 9.1
 UEBERHOEHUNG: 10:1



ABOVE	140
	130 - 140
	120 - 130
	110 - 120
	100 - 110
	90 - 100
	80 - 90
	70 - 80
	60 - 70
	0 - 60
BELOW	0

HYDRAULISCHE HOEHE
 IN METER UEBER NN

**Anlage 7: Analytische Abschätzung zum Diffusionseffekt
mit Hilfe der Lösung von Lapidus/Amundson**

Verwendete Einheiten:

Durchlässigkeitsbeiwert HKF in cm/a

Hydraulischer Gradient GRADH in cm/cm

Porosität PORO in cm^3/cm^3

Dispersivität ALPHA in cm

Trockenraumdichte ROHS in kg/cm^3

Diffusionskonstante DF in cm^2/a

Dispersionskoeffizient D in cm^2/a

Abstandsgeschwindigkeit V in cm/a

Retardationsfaktor R dimensionslos

VERSION 1: RECHNUNG MIT REINER DIFFUSION (DF=5.E-10 M**2/S)

HKF = 31,257002
 GRADH = 0,000000
 PORO = 0,100000
 ALPHA = 1,00
 ROHS = 1,30
 ADSO = 0,00
 DF = 157,000000
 D = 157,000000
 V = 0,000000
 R = 1,00

TIME = 200000,0 A

LAENGE (CM)	C/CO
3000,00	0,705010
6000,00	0,448971
9000,00	0,256083
12000,00	0,129959
15000,00	0,058331
18000,00	0,023123
21000,00	0,008050
24000,00	0,002458
27000,00	0,000657
30000,00	0,000153
33000,00	0,000031
36000,00	0,000006
39000,00	0,000001
42000,00	0,000000
45000,00	0,000000
48000,00	0,000000
51000,00	0,000000
54000,00	0,000000
57000,00	0,000000
60000,00	0,000000

TIME = 400000,0 A

LAENGE (CM)	C/CO
3000,00	0,798941
6000,00	0,592391
9000,00	0,421940
12000,00	0,284254
15000,00	0,180756
18000,00	0,108248
21000,00	0,060957
24000,00	0,032234
27000,00	0,015989
30000,00	0,007432
33000,00	0,003234
36000,00	0,001317
39000,00	0,000502
42000,00	0,000179
45000,00	0,000059
48000,00	0,000018
51000,00	0,000005
54000,00	0,000001
57000,00	0,000000
60000,00	0,000000

TIME = 600000,0 A

LAENGE (CM)	C/CO
3000,00	0,826989
6000,00	0,662017
9000,00	0,512020
12000,00	0,381977
15000,00	0,274471
18000,00	0,189726
21000,00	0,126028
24000,00	0,080374
27000,00	0,049173
30000,00	0,028841
33000,00	0,016207
36000,00	0,008722
39000,00	0,004492
42000,00	0,002214
45000,00	0,001044
48000,00	0,000470
51000,00	0,000203
54000,00	0,000084
57000,00	0,000033
60000,00	0,000012

VERSION 2; RECHNUNG MIT REINER DIFFUSION (DF = 7,5, E=10 M**2/S)

HKF = 31,557602
 GRADH = 0,000000
 PQRO = 0,100000
 ALPHA = 1,00
 RQHS = 1,30
 ADSO = 0,00
 DF = 235,000000
 D = 235,000000
 V = 0,000000
 R = 1,00

TIME = 200000,0 A

LAENGE (CM)	E/EO
3000,00	0,756997
6000,00	0,536013
9000,00	0,353263
12000,00	0,215825
15000,00	0,121832
18000,00	0,063374
21000,00	0,030312
24000,00	0,013308
27000,00	0,005356
30000,00	0,001973
33000,00	0,000665
36000,00	0,000205
39000,00	0,000058
42000,00	0,000015
45000,00	0,000003
48000,00	0,000001
51000,00	0,000000
54000,00	0,000000
57000,00	0,000000
60000,00	0,000000

TIME = 400000,0 A

LAENGE (CM)	E/EO
3000,00	0,826807
6000,00	0,661680
9000,00	0,511571
12000,00	0,381471
15000,00	0,273961
18000,00	0,189255
21000,00	0,125626
24000,00	0,080053
27000,00	0,048933
30000,00	0,028571
33000,00	0,016094
36000,00	0,008651
39000,00	0,004450
42000,00	0,002190
45000,00	0,001031
48000,00	0,000464
51000,00	0,000200
54000,00	0,000082
57000,00	0,000032
60000,00	0,000012

**Anlage 8: Analytische Abschätzungen zum Dispersionseffekt
mit Hilfe der Lösung von Lapidus/Amundson**

Verwendete Einheiten siehe Anlage 7

VERSION 1.1

```

=====
HKF = 1.000000
GRAPH = 1.000000
PORO = 0.020000
ALPHA = 100.00
ROHS = 1.30
ADSO = 0.00
DF = 157.787994
D = 5157.785160
V = 50.000000
R = 1.00
    
```

TIME = 60000.0 A

LAENGE (CM)	C/CO
100000.00	1.000000
200000.00	1.000000
300000.00	1.000000
400000.00	1.000000
500000.00	1.000000
600000.00	1.000000
700000.00	1.000000
800000.00	1.000000
900000.00	1.000000
1000000.00	1.000000
1100000.00	1.000000
1200000.00	1.000000
1300000.00	1.000000
1400000.00	1.000000
1500000.00	1.000000
1600000.00	1.000000
1700000.00	1.000000
1800000.00	1.000000
1900000.00	1.000000
2000000.00	1.000000
2100000.00	1.000000
2200000.00	1.000000
2300000.00	1.000000
2400000.00	1.000000
2500000.00	1.000000
2600000.00	1.000000
2700000.00	1.000000
2800000.00	1.000000
2900000.00	0.999970
3000000.00	0.500000
3100000.00	0.000029

TIME = 70000.0 A

LAENGE (CM)	C/CO
100000.00	1.000000
200000.00	1.000000
300000.00	1.000000
400000.00	1.000000
500000.00	1.000000
600000.00	1.000000
700000.00	1.000000
800000.00	1.000000
900000.00	1.000000
1000000.00	1.000000
1100000.00	1.000000
1200000.00	1.000000
1300000.00	1.000000
1400000.00	1.000000
1500000.00	1.000000
1600000.00	1.000000
1700000.00	1.000000
1800000.00	1.000000
1900000.00	1.000000
2000000.00	1.000000
2100000.00	1.000000
2200000.00	1.000000
2300000.00	1.000000
2400000.00	1.000000
2500000.00	1.000000
2600000.00	1.000000
2700000.00	1.000000
2800000.00	1.000000
2900000.00	1.000000
3000000.00	1.000000
3100000.00	1.000000
3200000.00	1.000000
3300000.00	1.000000
3400000.00	0.999901
3500000.00	0.500000
3600000.00	0.000099

VERSION 1.2

```

=====
HKF = 1.000000
GRADH = 1.000000
PORO = 0.020000
ALPHA = 1000.00
ROHS = 1.30
ADSO = 0.00
DF = 157.787994
D = DF + ALPHA * V
V = 50.000000
R = 1.00
    
```

TIME = 60000.0 A

LAENGE (CM)	C/CO
100000.00	1.000000
200000.00	1.000000
300000.00	1.000000
400000.00	1.000000
500000.00	1.000000
600000.00	1.000000
700000.00	1.000000
800000.00	1.000000
900000.00	1.000000
1000000.00	1.000000
1100000.00	1.000000
1200000.00	1.000000
1300000.00	1.000000
1400000.00	1.000000
1500000.00	1.000000
1600000.00	1.000000
1700000.00	1.000000
1800000.00	1.000000
1900000.00	1.000000
2000000.00	1.000000
2100000.00	1.000000
2200000.00	1.000000
2300000.00	1.000000
2400000.00	1.000000
2500000.00	1.000000
2600000.00	1.000000
2700000.00	0.999945
2800000.00	0.995030
2900000.00	0.901294
3000000.00	0.500000
3100000.00	0.098706
3200000.00	0.004970
3300000.00	0.000055

TIME = 70000.0 A

LAENGE (CM)	C/CO
100000.00	1.000000
200000.00	1.000000
300000.00	1.000000
400000.00	1.000000
500000.00	1.000000
600000.00	1.000000
700000.00	1.000000
800000.00	1.000000
900000.00	1.000000
1000000.00	1.000000
1100000.00	1.000000
1200000.00	1.000000
1300000.00	1.000000
1400000.00	1.000000
1500000.00	1.000000
1600000.00	1.000000
1700000.00	1.000000
1800000.00	1.000000
1900000.00	1.000000
2000000.00	1.000000
2100000.00	1.000000
2200000.00	1.000000
2300000.00	1.000000
2400000.00	1.000000
2500000.00	1.000000
2600000.00	1.000000
2700000.00	1.000000
2800000.00	1.000000
2900000.00	1.000000
3000000.00	1.000000
3100000.00	0.999999
3200000.00	0.999828
3300000.00	0.991499
3400000.00	0.883633
3500000.00	0.500000
3600000.00	0.116367